

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 16

2015

№ 7

Издается с 2000 года

ISSN 1684-6427

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Редакционный совет:

CHYI-YEU LIN, PhD, prof.
GROUMPOS P. P., prof., Greece
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.
КАЛЯЕВ И. А., чл.-корр. РАН, проф.
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г., чл.-корр. НАНБ, проф.
КУЗНЕЦОВ Н. А., акад. РАН, проф.
ЛЕОНОВ Г. А., чл.-корр. РАН, проф.
МАТВЕЕНКО А. М., акад. РАН, проф.
МИКРИН Е. А., акад. РАН, проф.
ПЕШЕХОНОВ В. Г., акад. РАН, проф.
РЕЗЧИКОВ А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
СЕБРЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН, проф.
СИГОВ А. С., акад. РАН, проф.
СОЙФЕР В. А., чл.-корр. РАН, проф.
СОЛОВЬЕВ В. А., чл.-корр. РАН, проф.
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М., чл.-корр. РАН, проф.
ФЕДОРОВ И. Б., акад. РАН, проф.
ЧЕНЦОВ А. Г., чл.-корр. РАН, проф.
ЧЕРНОУСЬКО Ф. Л., акад. РАН, проф.
ЩЕРБАТЮК А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
ЮСУПОВ Р. М., чл.-корр. РАН, проф.

Главный редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с. н. с.

Заместители гл. редактора:

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

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСАНДРОВ В. В., д. ф.-м. н., проф.
АНТОНОВ Б. И.
АРШАНСКИЙ М. М., д. т. н., проф.
БУКОВ В. Н., д. т. н., проф.
ВИТТИХ В. А., д. т. н., проф.
ГРАДЕЦКИЙ В. Г., д. т. н., проф.
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

- Рустамов Г. А.** K_{∞} -робастные системы управления 435
Балонин Н. А., Суздаль В. С., Козьмин Ю. С., Тонкошкур В. Н. Синтез модального регулятора в системах выращивания монокристаллов 443

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Бобырь М. В.** Адаптация системы управления мобильным роботом на основе нечеткой логики 449
Нелаева Е. И., Челноков Ю. Н. Решение прямых и обратных задач кинематики роботоманипуляторов с использованием дуальных матриц и бикватернионов на примере стэнфордского манипулятора. Часть 2 456
Нгуен Туан Зунг, Щербатов И. А. Совместное распознавание подвижных и неподвижных объектов в системе технического зрения робота 464
Лошицкий П. А., Шеховцова Е. Е. Расчет и моделирование работы промышленного манипулятора на силовых оболочковых элементах 470
Рачков М. Ю., Головин В. Ф., Архипов М. В. Робототехника для специальных применений в области физиотерапии. 476

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

- Белоусов Б. Н., Ксеневиц Т. И., Степнов В. Л., Климачкова А. С.** Проектирование и моделирование привода рулевого управления как ключевого элемента мехатронного опорно-ходового модуля 484
Крашмалев О. Н., Петрешин Д. И. Коррекция интегральных отклонений движения исполнительных механизмов промышленных роботов и многокоординатных станков 491

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

- Rzevski G., Madsen B., Скобелев П. О., Царев А. В.** Управление цепочками поставок с использованием мультиагентных технологий 497

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



MEKHATRONIKA, AVTOMATIZATSIIYA, UPRAVLENIE

Published since 2000

ISSN 1684-6427

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Editorial Council:

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

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:

BEZMEENOVA 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

- Rustamov G. A.** K_{∞} -Robust Control Systems 435
Balonin N. A., Suzdal V. S., Kozmin Yu. S., Tonkoshkur V. N. Modal Control Synthesis in Single Crystal Growth Systems. 443

ROBOT-TECHNOLOGICAL SYSTEMS

- Boby M. V.** Adaptation of the Mobile Robot Control System Based on Fuzzy Logic. 449
Nelaeva E. I., Chelnokov Yu. N. Solution to the Problems of Direct and Inverse Kinematics of the Robots-Manipulators Using Dual Matrices and Biquaternions on the Example of Stanford Robot Arm. Part 2 456
Nguyen Tuan Dung, Shcherbatov I. A. Joint Recognition of the Moving and Stationary Objects in the Machine Vision Systems of Robots 464
Loshitskiy P. A., Shehovcova E. E. Calculation and Simulation of an Industrial Manipulator on the Power of the Shell Elements 470
Rachkov M. Yu., Golovin V. F., Arkhipov M. V. Robotics for Special Applications in the Field of the Regenerative Medicine 476

ACTUATORS OF MECHATRONIC SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

- Belousov B. N., Ksenevich T. I., Stepnov V. L., Klimachkova A. S.** Mechatronics-Based Locomotion Module Designing and Modeling Approach. 484
Krakhmalev O. N., Petreshin D. I. Correction of Integrated Motion Deviations of Industrial Robots and Multi-Axis Machine Tools 491

INTELLIGENT TECHNOLOGIES IN AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

- Rzevski G. A., Madsen B., Skobelev P. O., Tsarev A. V.** Management of Network Supply System Based on Multi-Agent Technology 497

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

Г. А. Рустамов, д-р техн. наук, проф., gazanfar.rustamov@gmail.com,
Азербайджанский технический университет, г. Баку

K_{∞} -робастные системы управления

Обсуждается развитие классических систем управления с большим коэффициентом усиления, которые в классической постановке (М. В. Мееров) не нашли должного развития. Основу предложенного подхода составляет метод функции Ляпунова. В результате синтеза получено "робастное эквивалентное управление". Возможность беспредельного увеличения коэффициента усиления регулятора без нарушения устойчивости системы позволяет подавлять генеральные составляющие неопределенной модели до сколь угодно малой величины. Этим обеспечивается высокая точность слежения эталонной траектории и быстрое действие для широкого класса нелинейностей и неопределенностей. В пределе система описывается уравнением гиперплоскости для произвольного начального состояния. K_{∞} -робастная система применена к нелинейным многомерным связанным системам с интервальной неопределенностью. Показано, что удалось решить задачу автономности прямых каналов без использования компенсаторов перекрестных связей, что имеет важное прикладное значение. К недостаткам методики следует отнести отсутствие аналитической формулы для определения коэффициента усиления регулятора, усиление высокочастотных помех, имеющих непосредственный доступ в регулятор, а также использование производных выхода для формирования PD-регулятора. Кроме того, не всякий объект допускает реализацию высокого коэффициента усиления. Достоверность теоретических результатов подтверждена решением модельных задач на MATLAB/Simulink.

Ключевые слова: следящая робастная система, функция Ляпунова, большой коэффициент усиления, робастное эквивалентное управление, связанная система, перевернутый маятник

Введение

В настоящее время одним из бурно развивающихся направлений теории и практики автоматического управления является синтез и разработка систем управления в условиях неопределенности, в частности, робастных систем управления. Основным отличием понятия "робастные системы" от используемого в отечественной литературе термина "грубые системы" является тот факт, что робастные системы предназначены для поддержания качественных показателей и запасов устойчивости в допустимых пределах при изменении реквизитов объекта в широких пределах. Поэтому робастность можно характеризовать как "грубость в большом".

Широко распространенные робастные системы, основанные на H_{∞} -теории [1–5], изначально были задуманы как неадаптивные системы управления. Потом произошла мутация, и начали появляться работы под названием "Адаптивно-робастные системы...", "Комбинированные робастные системы..." и др., частично использующие средства адаптации. В этом направлении следует отметить использование наблюдателей неопределенностей, синтезированных на основе как нечеткой [6, 7], так и детерминированной постановок [8–10]. Между тем "очистка" номинальной динамики от всевозможных неопределенностей является обременительной и часто невыполнимой задачей из-за невозможности разделения движения, особенно в нелинейном случае. Поэтому в основном рассматриваются аддитивные и медленно изменяющиеся неопределенности [8–10].

Согласно ряду работ, например [11], неадаптивные системы, обладающие робастными свойствами, классифицируются как "пассивные адаптивные системы".

Потребность практики требует разработки простых методов управления, позволяющих обходить нелинейность, нестационарность и неопределенность объекта, что в контексте H_{∞} -теории и других неадаптивных методов робастного управления являются почти неразрешимой задачей. Простота может заключаться в подавлении (делении на большое число), а не в оценке нелинейностей и неопределенностей.

Среди методов построения неадаптивных робастных систем особый интерес представляют системы, позволяющие беспредельно увеличивать коэффициент усиления разомкнутой цепи без нарушения устойчивости системы. В классической постановке можно отметить работы [12, 13], а также [20].

Эти системы обладают высоким быстродействием и точностью для широкого класса неопределенностей. Однако сложность структуры в нелинейном случае и усиление высокочастотных помех, имеющих доступ в регулятор, ограничивают область применения подобных систем. Тем не менее, классические подходы в указанном направлении не нашли должного развития.

Во всех неадаптивных, тем более следящих робастных системах наблюдаются высокие коэффициенты усиления робастного регулятора, обусловленные свойствами робастности. Некоторые примеры в этом направлении приведены в работе [14].

Постановка задачи

Рассмотрим многомерный связанный объект, представленный в виде неопределенной системы дифференциальных уравнений вида

$$y_i^{(k)} = f_i(\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_m, t) + b_i^T(\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_m, t)u, \quad (1) \\ i = \overline{1, m}, k \in [1, n], t \in [0, \infty),$$

где $\mathbf{y}_i = (y_i, \dot{y}_i, \dots, y_i^{(k-1)})^T = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_k^i)^T \in R^k$ — доступный измерению или оценке вектор состояния; $y_i \in R$ — управляемые выходы; $u = (u_1, u_2, \dots, u_m)^T$ — вектор управляющих входов; $f_i(\cdot), b_i^T(\cdot) = [b_{i1}(\cdot), b_{i2}(\cdot), \dots, b_{im}(\cdot)] > 0$ — структурно неопределенные ограниченные функции.

Генеральные составляющие модели $f_i(\cdot)$ и $b_i^T(\cdot)$ являются источниками неопределенности, однако могут содержать и известные компоненты. В любом случае эти составляющие принимаются как потенциальные источники паразитной динамики и подавляются (делением на достаточно большое число). Взамен система наделяется новой эталонной линейной динамикой. В общем случае функции $f_i(\cdot)$ и $b_i^T(\cdot)$ могут содержать негладкие и разрывные нелинейности.

Рассматривается задача слежения, состоящая в выборе такого управления u_i , которое после завершения переходной составляющей обеспечивает движение выхода $y_i(t)$ неопределенного объекта (1) по эталонной траектории $y_{id}(t)$ с заданной точностью:

$$|y_{id}(t) - y_i(t)| \leq \delta_{is}, t \geq t_{is},$$

где $\delta_{is} = (1 \dots 5) \%$ — допустимая ошибка установления, t_{is} — время установления (settling time).

При этом состояние системы отслеживает эталонную траекторию $\mathbf{y}_{id} = (y_{id}, \dot{y}_{id}, \dots, y_{id}^{(k-1)})^T = (x_{1d}^i, x_{2d}^i, \dots, x_{kd}^i)^T$. Вектор ошибок слежения по каналу " $u_i - y_i$ " определяется выражением

$$\mathbf{e}_i = \mathbf{y}_{id} - \mathbf{y}_i = (e_i, \dot{e}_i, \dots, e_i^{(k-1)})^T = (e_1^i, e_2^i, \dots, e_k^i)^T.$$

Необходимо выполнить развязку многомерной связанной системы на m сепаратных (автономных) подсистем со своими эталонными траекториями (*reference trajectory*) $y_{id}(t)$ и управлениями u_i . Решение этой задачи связано с построением робастной следящей системы управления для каждого прямого канала. Эта задача в какой-то мере является стандартной, однако здесь решается совершенно иным способом без использования компенсаторов динамики перекрестных каналов.

Решение задачи

При сепарации (разделении) прямых каналов " $u_i - y_i$ " влияние перекрестных каналов, а также обратных связей по $\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_m, t$ на управляемый i -й выход $y_i(t)$ будем рассматривать как "приведен-

Из этой особенности можно прийти к заключению о том, что возможность беспредельного увеличения коэффициента усиления можно предусмотреть при постановке задачи, не дожидаясь результатов решения различных робастных задач, приводящих не известно откуда к появлению большого коэффициента усиления.

Прототипом данной работы является "метод локализации" А. С. Вострикова [20], основанный на "методе обратных задач динамики". Отметим ряд недостатков "метода локализации":

- закон управления содержит заданную эталонную функцию, зависящую от состояния объекта, а также высшую производную выхода. Такая конструкция усложняет реализацию управления. Кроме того, эталонная функция (траектория) может быть и неизвестной;
- замыкание системы с помощью управления, найденного на основе "метода обратных задач динамики", часто приводит к "короткому замыканию" (математически — к тождеству) [15] (или то же самое по А. Б. Филимонову — к нарушению причинно-следственной последовательности [20]), что требует модификации закона управления.

В работах [14—16] исследованы робастные системы управления с высоким коэффициентом усиления, построенные на основе метода функции Ляпунова.

В работах [14, 15] рассмотрены одномерные по входу и выходу системы, а в работе [16] — многомерные связанные системы. Можно отметить следующие недостатки этих работ. Во-первых, все работы в предложенном направлении не имеют характерного названия, позволяющего четко определить суть проводимых исследований. Во-вторых, в уравнении робастного регулятора [15—16] имеется избыток. Можно было обойтись лишь гипернаблюдателем неопределенностей.

В данной статье ставятся следующие цели: во-первых, сформулировать характерное название, позволяющее раскрыть суть предложенного подхода. Во-вторых, распространить полученные в работах [14—16] результаты на неопределенные многомерные связанные системы с использованием "эквивалентного робастного управления", предложенного в работе [14]. Такое управление описывается уравнением гиперплоскости с достаточно высоким коэффициентом усиления. Возможность беспредельного увеличения коэффициента усиления без потери устойчивости замкнутой системы позволяет подавлять (математически это эквивалентно делению на большое число) генеральные составляющие неопределенной модели до сколь угодно малой величины и стягивать все траектории к многообразию, характеризующему гиперплоскость. Дальнейшее движение системы в начало координат происходит по этой плоскости.

В дальнейшем по аналогии с H_∞ -робастными системами предложенные в статье системы будем называть K_∞ -робастными системами управления.

ные неконтролируемые возмущения". В этом случае уравнение объекта (1) удобно представить в виде

$$\begin{aligned} y_i^{(k)} &= \varphi_i(\mathbf{y}, t) + b_{ii}(\mathbf{y}, t)u_i; \\ \varphi_i(\mathbf{y}, t) &= f_i(\mathbf{y}, t) + \sum_{j \neq i}^m b_{ij}(\mathbf{y}, t)u_j; \end{aligned} \quad (2)$$

где $\varphi_i(\mathbf{y}, t)$ — ограниченное "приведенное неконтролируемое возмущение"; $\mathbf{y} = (\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_m)$.

Уравнение (2) описывает одномерный по входу и выходу объект. Поэтому при синтезе регулятора для каждого сепаратного " $u_i - y_i$ " канала будем использовать методику синтеза одномерных систем, предложенную в работе [14].

В работе [14] на основе метода функции Ляпунова при $V = 1/2s^2$ получено робастное эквивалентное управление:

$$u_{Req} = Ks = k(c_1e + c_2\dot{e} + \dots + e^{(k-1)}), \quad (3)$$

где $K > 0$ — достаточно большое число; $c_i > 0$ — угловые коэффициенты гиперплоскости $s = 0$.

При устремлении коэффициента усиления регулятора K в бесконечность замкнутая неопределенная система с объектом (2) и регулятором (3) описывается уравнением гиперплоскости

$$s = c_1e + c_2\dot{e} + \dots + e^{(k-1)} = 0, \quad s(0) = s_0. \quad (4)$$

При движении по гиперплоскости $s = 0$ порядок системы уменьшается на единицу. Поэтому для устойчивости движения по гиперплоскости $s = 0$ угловые коэффициенты c_i должны явиться коэффициентами Гурвицевого полинома пониженного порядка

$$S(p) = p^{k-1} + c_{k-1}p^{k-2} + \dots + c_1. \quad (5)$$

Вещественные части корней такого полинома $\text{Re}(p_i) < 0$.

В работе [14] по аналогии с работой [17] управление (3) названо "робастным эквивалентным управлением". Предложенное в работе [17] для полностью определенных объектов "эквивалентное управление" u_{eq} обеспечивает движение системы в начало координат по гиперплоскости $s = 0$ лишь из точек, находящихся на этой гиперплоскости (режим движения по вырожденной траектории). "Робастное эквивалентное управление" (3) при достаточно большом коэффициенте усиления K обеспечивает движение системы по $s = 0$ из произвольной начальной точки $s(0) = s_0$.

Передаточные функции

Согласно (3) и (4) передаточная функция робастного регулятора и замкнутой системы соответственно имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} W_C(p) &= \frac{U_C(p)}{E(p)} = \\ &= K(p^{k-1} + c_{k-1}p^{k-2} + \dots + c_3p^2 + c_2p + c_1); \quad (6) \\ W_{SYS}(p) &= S(p) = \\ &= p^{k-1} + c_{k-1}p^{k-2} + \dots + c_3p^2 + c_2p + c_1. \quad (7) \end{aligned}$$

Здесь U_C — выход регулятора (вход объекта); E — вход регулятора (сигнал рассогласования).

Особенности реализации. Реализовать регулятор на основе выражения (6) невозможно, поскольку оно содержит операторы идеального дифференцирования. При реализации оператора дифференцирования p обычно используется реальное дифференцирующее звено с передаточной функцией

$$W_d(p) = \frac{p}{T_d p + 1}. \quad (8)$$

Постоянная времени дифференциатора $T_d \approx 0,001 \dots 0,02$ с.

В этом случае передаточную функцию регулятора (6) можно представить в виде

$$\begin{aligned} W_C(p) &= K(c_1 + c_2 W_d + c_3 W_d^2 + \\ &+ \dots + c_{n-1} W_d^{n-2} + c_n W_d^{n-1}). \end{aligned} \quad (9)$$

Учитывая выражение (8) в формуле (9) и приравнявая в числителе $T_d = 0$, в силу его малости получим приближенную передаточную функцию, имеющую реализуемую форму в виде рациональной дроби:

$$W_C(p) \approx K \frac{p^{n-1} + c_{n-1}p^{n-2} + \dots + c_3p^2 + c_2p + c_1}{(T_d p + 1)^{n-1}}. \quad (10)$$

При $n = 2$ имеем:

$$W_C(p) \approx K \frac{p + c_1}{T_d p + 1}. \quad (11)$$

Для $n = 2$ при моделировании в качестве уравнения регулятора целесообразно использовать точное выражение

$$u = Ks, \quad s = c_1e + \dot{e}. \quad (12)$$

Определение параметров настройки

При движении из произвольной начальной точки $s(0) = s_0$ система при достаточно большом коэффициенте усиления K почти мгновенно попадает на гиперплоскость $s = 0$ и в дальнейшем движется по этой плоскости в начало координат. Поэтому движение системы с достаточно высокой точностью может быть описано уравнением гиперплоскости $s = 0$.

Движение по $s = 0$ определяется первыми $k - 1$ начальными условиями $\mathbf{e}_s(0) = (e(0), \dot{e}(0), \dots, e^{(k-2)}(0))^T$.

Настройка регулятора. Качественные показатели (время установления t_s , перерегулирование σ (%) и др.) переходной характеристики по ошибке $e(t)$ зависят от параметров настройки c_i , $i = 1, \dots, k - 1$, регулятора (6). Поскольку порядки регулятора и уравнения замкнутой системы одинаковы, то путем изменения параметров c_i можно разместить все полюса системы по желаемой схеме.

В общем случае для определения параметров настройки c_i можно использовать метод "модального управления". При этом в качестве желаемого характеристического полинома можно использовать, например, полиномы Чебышева, Баттерворса или полином, соответствующий минимуму некоторого интегрального показателя качества.

Монотонная переходная характеристика, $\sigma = 0\%$. Потребуем, чтобы переходная характеристика по ошибке слежения $e(t)$ не имела перерегулирования, т. е. являлась монотонной. С этой целью для корней p_i характеристического полинома замкнутой системы (7) выбираем биномиальное распределение. При таком распределении $p_1 = p_2 = \dots = p_{k-1}$. Кратность корней позволяет определить их на основе требуемого времени установления t_s переходной характеристики.

При кратных отрицательных (устойчивых) корнях выражение (7) можно представить в виде

$$W_{SYS}(p) = (p + p_1)^{k-1}.$$

Определим p_1 . При кратных корнях решение уравнения (4) имеет вид

$$e(t) = (C_1 + C_2 t + C_3 t^2 + \dots + C_n t^{k-2}) \exp(-p_1 t).$$

Определяя постоянные интегрирования для известного начального условия $\mathbf{e}_s(0)$, представим решение в векторном виде:

$$e(t) = C^T \theta \exp(-p_1 t), \quad C = Z^{-1} \mathbf{e}_s(0), \quad (13)$$

где

$$\theta = \begin{pmatrix} 1 \\ t \\ t^2 \\ \dots \\ t^{(k-2)} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{e}_s(0) = \begin{pmatrix} e(0) \\ \dot{e}(0) \\ \ddot{e}(0) \\ \dots \\ e^{(k-2)}(0) \end{pmatrix} = \mathbf{y}_{ds}(0) - \mathbf{y}_s(0);$$

$Z(t)|_{t=t_0=0}$ — квадратная матрица размера $(k-1) \times (k-1)$:

$$Z = \begin{bmatrix} z_1(t) & z_2(t) & \dots & z_{k-1}(t) \\ \dot{z}_1(t) & \dot{z}_2(t) & \dots & \dot{z}_{k-1}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_1^{(k-2)}(t) & z_2^{(k-2)}(t) & \dots & z_{k-1}^{(k-2)}(t) \end{bmatrix}_{t=t_0=0}$$

Фундаментальная система решений

$$z_1 = \exp(-p_1 t), \quad z_2 = t \exp(-p_1 t), \\ z_3 = t^2 \exp(-p_1 t), \quad \dots, \quad z_{k-1} = t^{k-2} \exp(-p_1 t).$$

В исследовательских задачах для k -го начального условия объекта можно принимать, например, $y^{(k-1)}(0) = 0$.

Пусть время установления (*settling time*) для $\delta_s = \pm (2 \dots 5)\%$ -ной допустимой ошибки задано:

$t = t_s$. Тогда согласно (13) для определения p_1 получаем следующее выражение:

$$e(t_s) = \pm \delta_s / 100 = C^T \theta|_{t=t_s} \exp(-p_1 t_s).$$

Если $e(0) > 0$, то и $\delta_s > 0$ (приближение сверху), иначе $\delta_s < 0$.

Соответствующее трансцендентное уравнение:

$$f(p_1) = C^T \theta|_{t=t_s} \exp(-p_1 t_s) \mp \delta_s / 100 = 0. \quad (14)$$

Для $k = 2$ параметры $\theta = 1$, $\mathbf{e}_s(0) = e(0)$, $Z^{-1} = 1 \Rightarrow C^T = e(0)$. Уравнение (14) примет вид

$$f(p_1) = e(0) \exp(-p_1 t_s) \mp \delta_s / 100 = 0. \quad (15)$$

Уравнение (14) при заданных δ_s , t_s и $\mathbf{e}_s(0)$ можно решить с помощью функций MATLAB `solve('f(p1) = 0')`. После вычисления p_1 параметры настройки c_i , $i = 1, \dots, k-1$, определяем как коэффициенты полинома

$$W_{SYS}(p) = (p + p_1)^{n-1} = \\ = p^{n-1} + a_{n-1} p^{n-2} + \dots + a_2 p + a_1. \quad (16)$$

Отсюда

$$c_1 = a_1, \quad c_2 = a_2, \quad \dots, \quad c_{n-1} = a_{n-1}. \quad (17)$$

При реализации регулятора в виде передаточной функции (11)

$$W_C(p) \approx K \frac{(p + p_1)^{n-1}}{(T_d p + 1)^{n-1}} \quad (18)$$

параметры c_i , $i = 1, \dots, k-1$, можно не вычислять.

Определение коэффициента усиления K . Этот параметр связан с объектом и настраивается на доминирующий источник. Поэтому K определяется экспериментально при компьютерном моделировании или на реальном объекте.

Если доминирующий источник известен, то его нужно реализовать, вызывая наихудший режим. Увеличивая K , следует контролировать ошибку слежения $e(t)$ в точке $t = t_s$ и добиться вхождения траектории $e(t)$ в коридор допустимой ошибки, т. е. выполнения условия $e(t) \leq |\delta_s| / 100$ для всех $t \geq t_s$.

После некоторого значения K в системе устанавливаются заданные σ и t_s . Однако не следует злоупотреблять значением K , поскольку это может привести к перерасходу энергии. Если энергия управления строго регламентирована, то целесообразно использовать экстремальный регулятор, подерживающий K на минимальном уровне в зависимости от ошибки слежения $e(t)$.

Результаты моделирования

Рассматриваемые здесь робастные системы управления относятся к параметрически неопределенным системам.

Пример 1. Пусть нелинейная модель двусвязного объекта задана системой нелинейных дифференциальных уравнений в форме "вход—выход":

$$\ddot{y}_1 + 2\dot{y}_1 + 10y_1^2 + a_2\dot{y}_2 = y_1y_2u_1 + \sin(5t)u_2 + v_1;$$

$$\ddot{y}_2 + 0,5\dot{y}_2 + 4y_2 + a_1y_1 = 2u_1 + \cos(5t)\dot{y}_1 u_2 + v_2.$$

Здесь $k = 2$, $m = 2$; $\mathbf{y}_1 = (y_1, \dot{y}_1)^T = (x_1^1, x_2^1)^T$, $\mathbf{y}_2 = (y_2, \dot{y}_2)^T = (x_1^2, x_2^2)^T$; $f_1 = -2\dot{y}_1 - 10y_1^2 - a_2\dot{y}_2 + v_1$, $f_2 = -0,5\dot{y}_2 - 4y_2 - a_1y_1 + v_2$; $b_{11} = y_1y_2$, $b_{12} = \sin(5t)$, $b_{21} = 2$, $b_{22} = \cos(5t)\dot{y}_1$.

Неконтролируемые внешние возмущения $v_1 = 1 + 0,5\sin(10t)$, $v_2 = \sin(5t)\cos(10t)$.

Модель (2) имеет вид

$$\ddot{y}_1 = \varphi_1 + b_{11}u_1;$$

$$\ddot{y}_2 = \varphi_2 + b_{22}u_2,$$

где "приведенные неконтролируемые возмущения" $\varphi_1 = f_1 + \sin(5t)u_2$, $\varphi_2 = f_2 + 2u_1$.

Параметры перекрестных связей по выходам a_2 , a_1 имеют интервальную неопределенность в диапазоне $a_2 \in [-4, +4]$, $a_1 \in [-2, +8]$.

При моделировании на MATLAB/Simulink использовано соответствующее уравнение состояния:

$$\dot{x}_1^1 = x_2^1;$$

$$\dot{x}_2^1 = \varphi_1 + x_1^1 x_1^2 u_1;$$

$$\dot{x}_1^2 = x_2^2;$$

$$\dot{x}_2^2 = \varphi_2 + \cos(5t)x_2^1 u_2;$$

$$y_1 = x_1^1; y_2 = x_1^2;$$

$$\varphi_1 = -10(x_1^1)^2 - 2x_2^1 - a_2x_2^2 + v_1 + \sin(5t)u_2;$$

$$\varphi_2 = -4x_1^2 - 0,5x_2^2 - a_1x_1^1 + v_2 + 2u_1.$$

1. *Первый канал* ($i = 1$) " $u_1 - y_1$ ". Здесь $k = 2$. В качестве эталонной траектории примем единичный скачок $y_d(t) = 1(t)$. Пусть при допустимой ошибке $\delta_s = 2\%$ время установления $t_s = 1$ с. При начальных условиях эталонной траектории $\mathbf{y}_d(0) = (1; 0)^T$ и объекта $\mathbf{y}(0) = (0; 0)^T$ начальное условие для ошибки $\mathbf{e}(0) = \mathbf{y}_d(0) - \mathbf{y}(0) = (1; 0)^T \Rightarrow \mathbf{e}_s(0) = e(0) = 1$.

Уравнение (15) принимает вид

$$f(p_1) = e(0)\exp(-p_1 t_s) \mp \delta_s/100 = 1 \cdot \exp(-p_1) - 0,02 = 0.$$

Используя функцию solve(\cdot), находим $p_1 = 3,912$. Тогда в соответствии с выражением (16) $S=p+3,912 \Rightarrow c_1 = 3,912$. В результате уравнение регулятора примет вид $u = K_1(3,912e + \dot{e})$.

Согласно (18) передаточная функция регулятора

$$W_C(p) = K_1 \frac{p + 3,912}{T_d p + 1}.$$

При $k = 2$ для регулятора используем точное выражение $u = K_1(3,912e + \dot{e})$.

2. *Второй канал* ($i = 2$) " $u_2 - y_2$ ". Теперь для эталонной траектории примем гармонический сигнал $y_d(t) = \sin(4t)$. Пусть $\delta_s = 2\%$, а время установления $t_s = 2$ с. Начальное условие эталонной траектории $\mathbf{y}_d(0) = (0; 1)^T$. Пусть начальное условие объекта $\mathbf{y}(0) = (1,5; 0)^T$. Тогда $\mathbf{e}(0) = \mathbf{y}_d(0) - \mathbf{y}(0) = (-1,5; 1)^T \Rightarrow \mathbf{e}_s(0) = e(0) = -1,5$.

Уравнение (15) принимает вид

$$f(p_1) = e(0)\exp(-p_1 t_s) \mp \delta_s/100 = -1,5 \cdot \exp(-2p_1) + 0,02 = 0.$$

Используя функцию solve(\cdot), находим $p_1 = 2,159$. Тогда в соответствии с выражением (16) $S=p+2,159 \Rightarrow c_1 = 2,159$. В результате имеем уравнение регулятора $u = K_2(2,159e + \dot{e})$.

Согласно (18) передаточная функция регулятора имеет вид

$$W_C(p) = K_2 \frac{p + 2,159}{T_d p + 1}.$$

При $k = 2$ для регулятора используем точное выражение $u = K_2(2,159e + \dot{e})$.

На рис. 1 (см. вторую сторону обложки) для семи значений параметров, взятых из интервала $a_2 \in [-4, +4]$, $a_1 \in [-2, +8]$, показаны пучки переходных характеристик $\{y_1(t)\}$ (рис. 1, а) и соответствующие сигналы управления $\{u_1(t)\}$ (рис. 1, б) при $K_1 = 250$, а также показаны $\{y_2(t)\}$ (рис. 1, в) и $\{u_2(t)\}$ (рис. 1, г) при $K_2 = 120$.

Как видно из рис. 1, а и рис. 1, в, по обоим каналам для пучков переходных характеристик $\{y_1(t)\}$ и $\{y_2(t)\}$ удовлетворяются (пусть визуально) заданные показатели качества $\sigma = 0\%$, $t_s = 1$ с и $\sigma = 0\%$, $t_s = 2$ с.

Пример 2. Перевернутый маятник. Принимая обозначения $x_1 = \theta$, $x_2 = \dot{\theta}$, уравнение нелинейного перевернутого маятника, используемое в работе [18], можно представить в следующем виде [19]:

$$\dot{x}_1 = x_2;$$

$$\dot{x}_2 = \frac{g \sin x_1 - \left(\frac{m l x_2^2 \cos x_1 \sin x_1}{m_c + m} \right)}{l \left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 x_1}{m_c + m} \right)} + \frac{\cos x_1}{m_c + m} u + v(t);$$

$$y = x_1.$$

Параметры объекта: $m_c = 1,5$ кг, $m = 0,2$ кг, $l = 1$ м, $g = 9,8$ м/с². Пусть начальное состояние объекта $\mathbf{y}(0) = \mathbf{x}(0) = (1 \text{ рад}; 0 \text{ рад/с})^T$.

На рис. 2 представлена кинематическая схема перевернутого маятника.

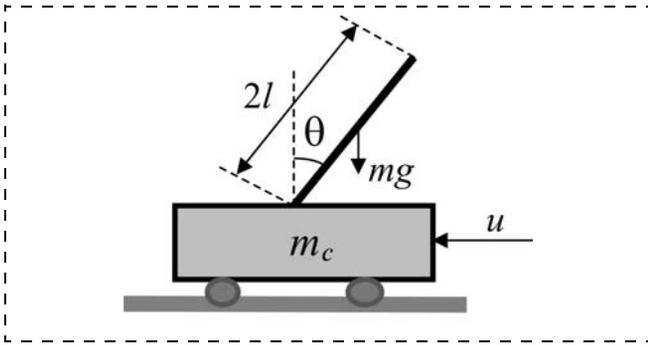


Рис. 2. Кинематическая схема перевернутого маятника

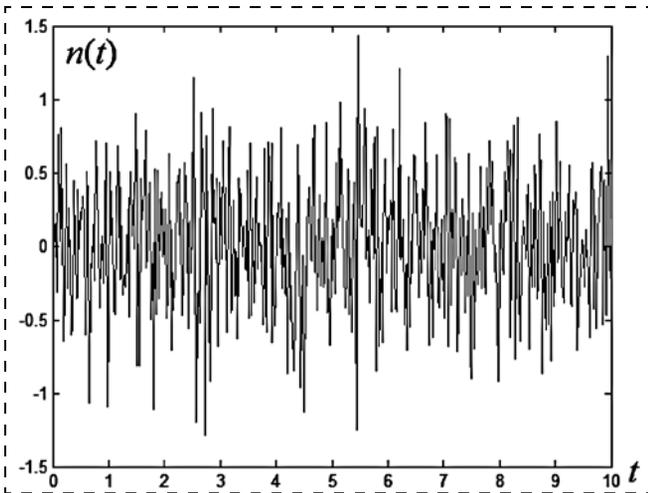


Рис. 3. Гауссовская помеха

На объект в точке приложения управления действует гауссовская помеха $v(t)$, представленная на рис. 3.

Пусть эталонная траектория задана в виде: $y_d = \theta_d = 0,2\sin(t) + 0,05 \cos(3t)$. Начальное значение $y_d(0) = (0,05; 0,2)^T$.

Требуемые показатели качества: перерегулирование $\sigma = 0\%$; время установления $t_s = 1$ с для $\delta = \pm 2\%$ -ной допустимой ошибки регулирования.

Вычисляем начальное значение ошибки: $e(0) = y_d(0) - y(0) = (e(0); \dot{e}(0))^T = (-0,95; 0,2)^T$.

Поскольку $k = 2$, то регулятор имеет один параметр настройки c_1 . Для определения c_1 сначала вычисляем p_1 . При $k = 2$ значения $Z^{-1} = 1$, $e_s(0) = e(0)$, $\theta = 1 \Rightarrow C^T = e(0)$. Тогда уравнение (15) имеет вид

$$f(p_1) = e(0)\exp(-p_1 t_s) + 0,02 = -0,95\exp(-p_1) + 0,02 = 0.$$

Используя функцию $\text{solve}(\cdot)$, находим $p_1 = 3,86$. Тогда в соответствии с выражением (16) $S = p + 3,86 \Rightarrow c_1 = 3,86$.

В результате уравнение регулятора имеет вид: $u = K(3,86e + \dot{e})$.

На рис. 4 показаны графики изменения ошибки регулирования $e(t)$ в зависимости от коэффициента усиления K (рис. 4, а) и фазовый портрет системы (рис. 4, б) при номинальных значениях параметров объекта.

Для номинальных значений параметров уже при $K = 120$ выполняются заданные показатели качества $\sigma = 0\%$, $t_s = 1$ с. Дальнейшее увеличение k не оказывает ощутимого влияния на показатели качества, однако приводит к увеличению энергии управления.

Фазовый портрет системы построен при начальных условиях $y(0) = x_1(0) = [-0,3; 0,5; 1; -0,5; -1; 0,5]$, $\dot{y}(0) = x_2(0) = [5; 2; 2, -1; -1; -4]$. Начальные условия ошибки и ее производной вычислены как $e(0) = y_d(0) - x_1(0)$, $\dot{e}(0) = -x_2(0)$. При $K = 120$ все траектории стягиваются к линии $s = \dot{e} + 3,86e = 0$.

В начальный момент времени управляющий сигнал принимает довольно высокое значение $u(0) = -870$. Поэтому с помощью блока *Saturation* (насыщение) сигнал был ограничен на интервале $-150 \leq u(t) \leq 150$, $t \geq 0$. Наложение позиционного ограничения на управление сужает допустимый интервал варьирования параметров.

Рассмотрим случай параметрической неопределенности. Пусть масса тележки $m_c = 1,5$ кг изменяется на $\approx \pm 50\%$.

На рис. 5 показаны пучки переходных характеристик по выходу $\{y(t)\}$ (рис. 5, а), ошибке $\{e(t)\}$ (рис. 5, б) и сигнал управления $\{u(t)\}$ (рис. 5, в) при $m_c = [0,5; 1,0; 1,5; 2,5]$, $K = 200$ и начальном условии

объекта $y(0) = (1; 0)^T$ в случае приложения на вход объекта помехи $v(t)$.

На рис. 6 показаны переходные характеристики для различных начальных условий, приведенных выше.

Концентрация пучков $\{y(t)\}$ и $\{e(t)\}$ довольно высокая. Через $t_s \approx 1$ с выход объекта $\{y(t)\}$ начинает довольно точно отслеживать эталонную траекторию $y_d(t)$.

В ослаблении действующих на вход объекта помех существенную роль играет фильтрующее свойство самого объекта. Задача синтеза усложняется, тогда, когда помеха прилагается к наблюдаемому выходу $y(t)$ (в виде помехи

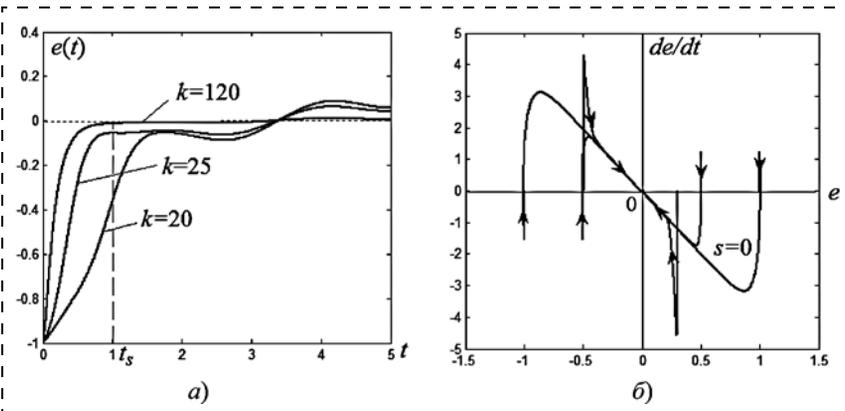


Рис. 4. Графики изменения ошибки и фазовый портрет системы

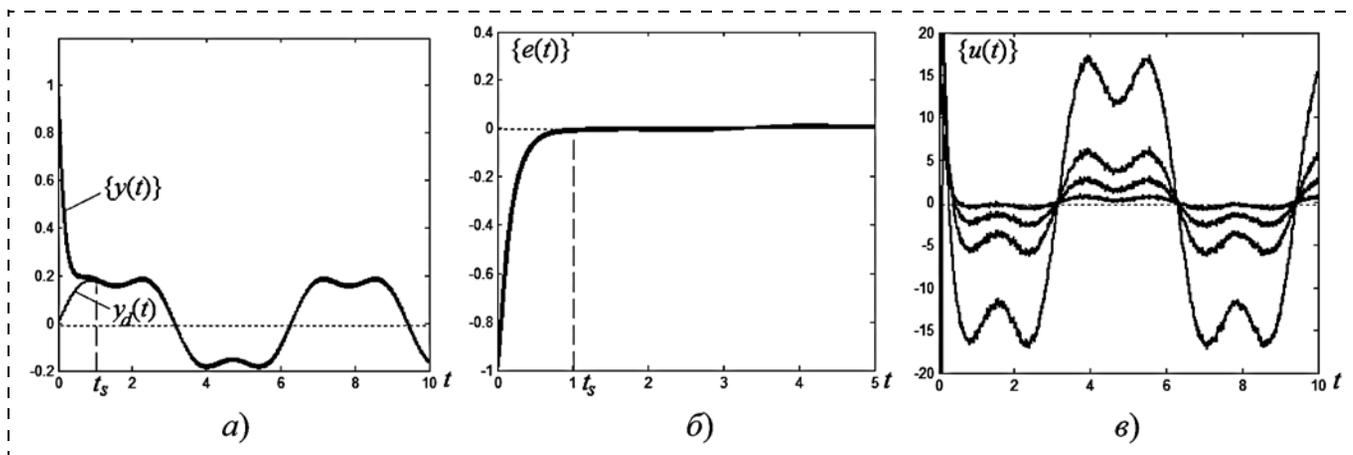


Рис. 5. Переходные характеристики и сигнал управления при изменении массы тележки

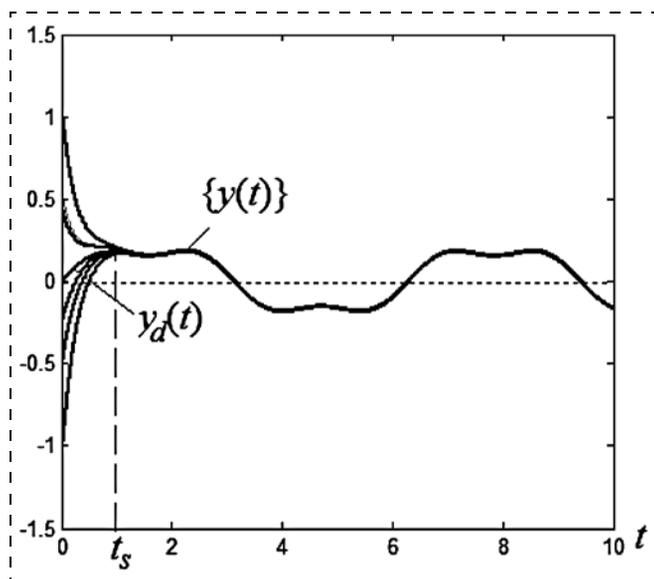


Рис. 6. Переходные характеристики при различных начальных условиях

измерения) или к эталонной траектории $y_d(t)$. При этом помеха имеет непосредственный "доступ" к регулятору и искажает сигнал управления.

На рис. 7 (см. вторую сторону обложки) показаны переходные характеристики по выходу при наложении помехи на эталонный сигнал $\tilde{y}_d = y_d(t) + v(t)$ и $m_c = [1; 1,5; 2]$.

В данном случае происходит усиление помехи. Эта особенность является характерной для систем управления с большим коэффициентом усиления. Для ослабления уровня помехи можно использовать фильтр низкой частоты.

Заключение

В работе рассмотрен один из возможных подходов к построению следящих робастных систем управления с большим коэффициентом усиления. Предложенная методика позволяет обойти слож-

ные математические трудности, присущие большинству известных подходов к синтезу робастных систем, и управлять нелинейными нестационарными объектами в условиях существенной неопределенности с помощью простого физически понятного PD^{n-1} -регулятора.

Преимущество методики заключается в следующем:

- используется незначительная информация об объекте — достаточно структурное представление модели. Исключение составляет H_∞ -теория, где используется точная номинальная модель объекта;
- не используются наблюдатели неопределенностей, которые уменьшают быстродействие системы и создают новые неудобства, связанные с известными проблемами сходимости в реальных условиях;
- простота синтеза и возможность построения простых робастных регуляторов, востребованных в промышленных приложениях;
- независимость настроек c_i , $i = 1, \dots, k - 1$, и K ;
- возможность решить задачу автономности прямых каналов без использования компенсаторов перекрестных каналов, что имеет важное прикладное значение.

Недостатки методики:

- отсутствие аналитической формулы для определения коэффициента усиления K ;
- для формирования регулятора необходимо измерить (или оценить) производные выходной величины объекта;
- происходит усиление высокочастотных помех, имеющих непосредственный доступ к регулятору. При зашумленном входе можно использовать фильтр низких частот;
- не все объекты допускают реализации чрезмерно большого коэффициента усиления.

Решение модельной задачи с использованием пакета MATLAB/Simulink позволило сделать ряд положительных выводов, имеющих важное прикладное значение.

Список литературы

1. Doyle J. C., Glover K., Khargonekar P. P., Francis B. A. State-space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems // IEEE Trans. Automat. Control. 1989. Vol. AC-34. № 8. P. 831–847.
2. Chen Y. H., Piontek E. D. Robust modal Control of distributed parameter system with uncertainty // Proc. Amer. Contr. San Diego. Calif. 1990. Vol. 2. P. 2014–2019.
3. Позняк А. С. Основы робастного управления (H_∞ -теория). М.: Изд-во МФТИ, 1991. 128 с.
4. Zhou K., Doyle J. C., Glover K. Robust and Optimal Control. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall Inc., 1996.
5. Поляк Б. Т., Шербаков П. С. Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002.
6. Ho H. F., Wong Y. K., Rad A. B. Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control Design: Lyapunov Approach // Proc. IEEE International Conference on Fuzzy System. 2001. P. 6–11.
7. Lee H., Tomizuka M. Adaptive Traction Control. University of California, Berkeley. Department of Mechanical Engineering. September. 1995. P. 95–32.
8. Казурова А. Е., Потапенко Е. М. Возможные варианты построения высокоточных систем управления упругой неопределенной электромеханической системой // Электротехника та електроенергетика. 2009. — № 2. С. 4–14.
9. Потапенко Е. М. Сравнительная оценка робастных систем управления с различными типами наблюдателей // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1995. № 1. С. 109–116.
10. Потапенко Е. М. Исследование робастности систем управления с наблюдателями // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1996. № 2. С. 104–108.
11. Чаки Ф. Современная теория управления: Нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. М.: Мир, 1975.
12. Мееров М. В. Системы автоматического управления, устойчивые при бесконечно больших коэффициентах усиления // Автоматика и телемеханика. 1947. Т. 8, № 4. С. 225–243.
13. Мееров М. В. Синтез структур систем автоматического управления высокой точности. М.: Наука, 1967. 423 с.
14. Рустамов Г. А. Робастная система управления с повышенным потенциалом // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 324, № 5. С. 13–19.
15. Rustamov G. A. Absolutely robust control systems // Automatic Control and Computer Sciences. 2013. V. 47, № 5. P. 227–241.
16. Rustamov G. A. Design of Absolutely Robust Control Systems for Multilinked Plant on the Basis of an Uncertainty Hyperobserver // Automatic Control and Computer Sciences. 2014. V. 48, № 3. — P. 129–143.
17. Уткин В. И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. — М.: Наука. 1981. 368 с.
18. Wang L. X. A course in fuzzy systems and control. Englewood Cliffs, NJ.: Prentice Hall. 1997.
19. Geng F., Zhu X. Novel Adaptive Fuzzy control of the Inverted Pendulum System / IEEE International Conference on Control and automation Guangzhou. CHINA-May 30 to June 1. 2007. P. 284–288.
20. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Метод больших коэффициентов усиления и эффект локализации движения в задачах синтеза систем автоматического управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 2 (95). С. 2–10.

K_∞ -Robust Control Systems

G. A. Rustamov, gazanfar.rustamov@gmail.com✉,
Azerbaijani Technical University, Baku, AZ 1073, Azerbaijan

Corresponding author: Rustamov Gazanfar A., D. Sc., Professor,
Azerbaijani Technical University, Baku, AZ 1073, Azerbaijan,
e-mail: gazanfar.rustamov@gmail.com

Received on November 02, 2014

Accepted November 24, 2014

The article presents development of the classical control systems with a high gain. In the classical formulation (M. V. Meyerov) these systems found no proper development. The basis of the proposed approach is the method of Lyapunov functions. As a result of a synthesis "a robust equivalent control" was obtained. A possibility of a limitless increase of the controller gain without violation of the stability of the system makes it possible to suppress the general components of an uncertain model to an arbitrarily small value. This ensures a high precision of the reference trajectory tracking and speed for a wide class of nonlinearities and uncertainties. In the limit the system is described by the equation of the hyperplane for an arbitrary initial state. K_∞ -robust system is applied to a nonlinear multidimensional coupled systems with an interval uncertainty. The author managed to solve the problem of autonomy of the direct channels without the use of the cross-channel compensators, which is of important practical significance. The disadvantages of the proposed methodology are absence of the analytical formula for determination of the gain coefficient of the controller, gain of the highfrequency noise having immediate access to the controller, as well as the use of the output derivative for formation of PD controller. Moreover, not every object can achieve a high gain. The theoretical results were proved by solving of the model problems on MATLAB/Simulink.

Keywords: robust tracking system, Lyapunov function, high gain, robust equivalent control, related system, inverted pendulum

For citation:

Rustamov G. A. K_∞ -Robust Control Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 7, pp. 435–443.

DOI: 10.17587/mau.16.435-443

References

1. Doyle J. C., Glover K., Khargonekar P. P., Francis B. A. State-space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems, *IEEE Trans. Automat. Control*, 1989, vol. AC-34, no. 8, pp. 831–847.
2. Chen Y. H., Piontek E. D. Robust modal Control of distributed parameter system with uncertainty, *Proc. Amer. Contr. San Diego. Calif.*, 1990, vol. 2, pp. 2014–2019.
3. Poznyak A. S. *Osnovy robastnogo upravleniya (H_∞ -teoriya)* (Fundamentals of robust control (H_∞ — theory)), Moscow, Publishing house of Moscow Physical-Technical University, 1991, 128 p. (in Russian).
4. Zhou K., Doyle J. C., Glover K. Robust and Optimal Control. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall Inc., 1996.
5. Polyak B. T., Sherbakov P. S. Robastnaya ustoychivost i upravleniye (Robust stability and control), Moscow, Nauka, 2002 (in Russian).
6. Ho H. F., Wong Y. K., Rad A. B. Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control Design: Lyapunov Approach, *Proc. IEEE International Conference on Fuzzy System*, 2001, pp. 6–11.
7. Lee H., Tomizuka M. Adaptive Traction Control, University of California, Berkeley, Department of Mechanical Engineering, September, 1995, pp. 95–32.
8. Kazurova A. E., Potapenko E. M. *Vozmojniyi varianti postroyeniya visokotochnikh systems upravleniya dlya uprugoy neopredelennoy elektricheskoy sistemoy* (Possible options of design of high-precision

control systems for elastic uncertain electromechanical systems), *Elektrotehnika i elektroenergetika — Electrical engineering and electricity*, 2009, no. 2, pp. 4–14 (in Russian).

9. **Potapenko E. M.** *Sravnitel'naja ochenka pobastnich system upravlenija s razlichnymi tipami nabludatel'j* (Comparative evaluation of robust control systems with different types of observers), *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemi upravlenija — Bulletins of the Academy Sayns Rashin. Teorey and control systems*, 1995, no. 1, pp. 109–116 (in Russian).

10. **Potapenko E. M.** *Issledovanije robnosti system upravlenija s nabljudatelem* (Research of robust control systems with observers), *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemi upravlenija — Bulletins of the Academy Sayns Rashin. Teorey and control systems*, 1996, no. 2, pp. 104–108 (in Russian).

11. **Chaki F.** *Sovremennaya teoriya upravlenija: Nelineyniy, optimalmniy i adaptivniy sistemi* (Nonlinear, optimal and adaptive systems), Moscow, Mir, 1975, 224 p. (in Russian).

12. **Meyerov M. V.** *Sistemy avtomaticheskogo upravlenija, ustojchivye pri beskonechno bolshih koefficientah usilenija* (Stable automatic control systems with an infinitely large gain coefficient). *Avtomatika i Telemekhanika (Automation and Telemechanics)*, 1947, vol. 8, no. 4, pp. 225–243 (in Russian).

13. **Meyerov M. V.** *Sintez struktur system avtomaticheskogo upravlenija vysokoj tochnosti* (Synthesis of structures of automatic control systems with high precision), Moscow, Nauka, 1967, 423 p. (in Russian).

14. **Rustamov G. A.** *Robastnaya sistema upravleniya s povyshennym potentsialom* (Robust control system with high potential), *Bulletins of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 5, pp. 13–19 (in Russian).

15. **Rustamov G. A.** Absolutely robust control systems, *Automatic Control and Computer Sciences*, 2013, v. 47, no. 5, pp. 227–241.

16. **Rustamov G. A.** Design of Absolutely Robust Control Systems for Multilinked Plant on the Basis of an Uncertainty Hyperobserver, *Automatic Control and Computer Sciences*, 2014, v. 48, no. 3, pp. 129–143.

17. **Utkin V. I.** *Sliding Modes in Optimization and Control Problems*, New York, Springer Verlag, 1992, 420 p.

18. **Wang L. X.** *A course in fuzzy systems and control*, Englewood Cliffs, NJ., Prentice Hall, 1997.

19. **Geng F., Zhu X.** Novel Adaptive Fuzzy control of the Inverted Pendulum System, *IEEE International Conference on Control and automation Guangzhou, CHINA* — May 30 to June 1, 2007, pp. 284–288.

20. **Filimonov A. B., Filimonov N. B.** *Metod bolshix koeffitsiyentov usileniya i effekt lokalizatsii dvizheniya v zadachakh sinteza system avtomaticheskogo upravleniya* (Method of Major Amplification Factors and the Effect of Localization of Movements in the Problems of Design of Automatic Control Systems), *Mechatronika, Avtomatizasiya, Upravlenie*, 2009, no. 2 (95), pp. 2–10 (in Russian).

УДК 621.3.078.3

DOI: 10.17587/mau.16.443-448

Н. А. Балонин, д-р техн. наук, доц., korbendfs@mail.ru,

Государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург,

В. С. Суздаль, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., suzda@isma.kharkov.ua,

Ю. С. Козьмин, канд. техн. наук, науч. сотр., ukoz55@mail.ru,

В. Н. Тонкошкур, инженер, Vladimir-t63@mail.ru,

Институт сцинтилляционных материалов НАН Украины, г. Харьков

Синтез модального регулятора в системах выращивания монокристаллов

Рассматривается задача синтеза модального управления на основе мер модального доминирования. Параметры переходного процесса в замкнутой системе управления процессом выращивания сцинтилляционных монокристаллов показывают, что синтезированная система удовлетворяет требованиям к качеству управления.

Ключевые слова: модальное управление, модальное доминирование, управление выращиванием монокристаллов

Введение

Модальное управление обычно определяется как управление, которое решает задачу выбора собственного пространства динамической системы, т. е. размещения ее собственных чисел, или собственных векторов, для достижения целей управления. Проблема модального синтеза, поставленная Калманом, получила свое развитие в ряде работ [3–7]. Впервые строго математическая постановка задачи модального управления для линейных систем с полным выходом была сформулирована и решена в статье [4], где было показано, что критерием разрешимости задачи является полная управляемость рассматриваемой системы (выполнение критерия Калмана).

Для многосвязных систем выбор спектра выливается в малопривлекательную проблему манипулирования большим числом собственных значений, что существ-

венно осложняет процесс исследования их влияния на поведение динамической системы, т. е. основная проблема практического модального синтеза состоит в избыточном числе параметров, влияющих на которые, можно получать системы с различными свойствами.

Разработчики обычно определяют желаемый спектр синтезируемой системы на основе эвристических соображений. В монографии [2] предложен метод синтеза на основе мер модального доминирования, сводящий выбор многих собственных значений к выбору одного или нескольких показателей, описывающих сжатие спектра. Меры модального доминирования дают формальную оценку подвижности "позиций" собственных значений и позволяют при синтезе количественно контролировать тенденции изменения спектра.

Синтез регулятора методом модального доминирования

В задачах синтеза структура и порядок математической модели предполагаются заданными. Модель объекта управления (ОУ) в пространстве состояний имеет вид

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu, & x(t_0) = x_0, \\ y = Cx + Du, \end{cases} \quad (1)$$

где $x \in R^n$ — вектор состояния, $y \in R^l$ — выходной вектор, $u \in R^m$ — вектор управления, подаваемого на вход ОУ, x_0 — начальные условия, т. е. состояние ОУ в начальный момент времени t_0 , A, B, C — постоянные матрицы соответствующих размеров.

В модальном синтезе с помощью линейных обратных связей по состоянию $u = -Kx$ требуется синтезировать матрицу замкнутой системы с желаемым спектром замкнутой системы $Q = A - BK$, который надо уметь задавать. В предлагаемом подходе анализ спектра ОУ предваряет синтез. Собственные значения объекта управления λ_i определяют начальные позиции, которые изменяются в синтезе с текущей оценкой меры доминирования.

Для синтеза систем модального управления в работе [2, стр. 72] предложено использовать меры модального доминирования в собственном пространстве по управляемости μ_u и наблюдаемости μ_v .

Определение. Мерой модальной управляемости μ_u (наблюдаемости μ_v) называется величина, обратная по отношению к минимальной норме матрицы линейного регулятора $u = -Kx$ (наблюдающего устройства) при переносе одного отдельно взятого собственного значения на окружность единичного радиуса в окрестности варьируемой точки спектра разомкнутой системы:

$$\mu_u = v^T B B^T v, \quad (2)$$

$$\mu_v = v^T C_k C_k^T v, \quad (3)$$

где v — левый собственный вектор матрицы A ; C_k — вектор-строка по исследуемому выходу, т. е. мера доминирования по наблюдаемости подвязывается к конкретному выходу.

Рассмотрим систему с комплексным собственным пространством матрицы A . Необходимо оптимизировать матрицу обратных связей и разместить спектр в желаемом положении. Спектр перед его перемещением анализируется на комплексность, и затем задается смещение вещественным и комплексным собственным значениям — последние смещаются комплексно-сопряженными парами.

Можно предложить два подхода к синтезу.

Подход 1. Для систем низкого порядка можно использовать однократное изменение собственных значений, опираясь на информацию об их мерах доминирования. Расчет при изменении собственных значений состоит в вычислении соответствующих собственных векторов матрицы замкнутой системы Q и их последующем использовании:

$$(A - \lambda_1 I)S_1 = B M_1, \quad (A - \lambda_n I)S_n = B M_n, \quad (4)$$

где $S = [S_1 \dots S_n]$ — матрица собственных векторов Q . Настраиваемые векторные множители образуют матрицу $M = [M_1 \dots M_n]$, их рекомендуемые в работе [2] значения $M_1 = B^T v_1^*$, ..., $M_n = B^T v_n^*$ берут в расчет сопряженные компоненты левых собственных векторов v_i^* матрицы A . Матрица обратных связей

$$K = M S^{-1}. \quad (5)$$

Ограничение в этом подходе заключается в том, что при малом смещении начинает проявляться почти вырожденность матриц $A - \lambda_i I$.

Подход 2. Используется алгоритм итерационного смещения собственных значений.

Итерационный алгоритм оптимизации спектра основан на принципе равных пропорций — при последовательной коррекции спектра изменения собственных значений следует выбирать прямо пропорциональными мерам их модального доминирования; чем выше мера, тем более глубокая вариация возможна для точки спектра.

Матрица обратных связей $u = -Kx$ для одиночного перемещения каждого собственного значения v_i

имеет вид $K_i = B^T v_i v_i^T Q$ или

$$K_i = B^T v_i v_i^T \Delta / \mu_u, \quad (6)$$

где Δ — изменение собственного значения; $v_i Q$ — левый собственный вектор матрицы Q , коллинеарный левому собственному вектору v_i матрицы A .

Отметим, что левые собственные векторы, соответствующие варьируемым собственным числам, вычисляются как (транспонированные) вектор-строки инвертированной матрицы нормированных собственных векторов. Как видно, норма матрицы K_i обратно пропорциональна мере доминирования (2).

Назовем элементарным изменением спектра сдвиг только одного собственного значения с сохранением прочих собственных значений и векторов матрицы A . В работе [2] доказывается теорема, что в режимах малых перемещений собственных значений матрицу регулятора можно аппроксимировать суммой матриц регуляторов, реализующих элементарное изменение спектра, т. е.

$$K \cong K_1 + \dots + K_i + \dots + K_n. \quad (7)$$

Аналитическое решение задачи модального синтеза возможно при итерационной подвижке собственных значений одного за другим, опирающейся на меру модального доминирования каждого собственного значения в виде нормы матрицы обратных связей модального регулятора при одиночном изменении спектра. Необходимо переносить все собственные значения на малое расстояние пропорционально их мерам модального доминирования. Перенос мод будет успешен, очевидно, если амплитуды сигналов обратных связей лежат в зоне приемлемых исполняемых регулятором значений. Практическая реализуемость синтеза, тем самым,

зависит от характера масштабирования переменных состояния и управления, отражающегося в том числе на нормах столбцов матрицы B , входящей в определение меры.

Для коллективной подвижки λ_i введен коэффициент сжатия спектра s , причем $\Delta = s\mu$, т. е. чем меньше коэффициент сжатия спектра s , тем точнее будет выполнен совместный перенос. Этот коэффициент можно варьировать в процессе итераций, добиваясь необходимого технологией вида переходного процесса и учитывая ограничения на норму матрицы коэффициентов обратных связей, что дает косвенную гарантию хорошего синтеза.

Объект управления

В качестве ОУ выбран процесс выращивания сцинтилляционных монокристаллов (СМК) методом Чохральского на установках типа "РОСТ" (рис. 1). Монокристалл 2 вращается с некоторой угловой скоростью и вытягивается на затравку. В процессе роста монокристалла в тигле 1 автоматически поддерживают постоянный уровень расплава, подпитывая его исходным сырьем, которое предварительно подают в расположенную коаксиально тиглю кольцевую емкость для расплавления этого сырья боковым нагревателем 5.

Процесс выращивания включает в себя несколько основных этапов: инициирование роста монокристалла с помощью затравочного кристалла (затравливание) и вытягивание образца сначала с переменным сечением (разрачивание кристалла), а затем с постоянным сечением (рост по высоте). Затравливание и разрачивание кристалла ведется в ручном режиме без включения обратной связи в системе управления. Система управления диаметром монокристалла включается с началом роста кристалла по высоте. Этот момент определяет начальные условия управления.

Известно, что качество кристалла определяется стабильностью массовой скорости его роста, а также стабильностью формы фронта кристаллизации 3 и равномерностью вхождения активатора по длине кристалла. В системах управления кристаллизацией скорость роста косвенно оценивается по диаметру растущего монокристалла, который и стабилизируется в процессе выращивания. Диаметром растущего кристалла управляют, изменяя тепловые условия выращивания. Для оценки диаметра растущего кристалла применяют метод измерения падения уровня расплава в результате быстрого дискретного подъема кристалла из расплава на малую величину [1]. Падение уровня расплава измеряется уровнемером 4. Современные требования к стабильности диаметра монокристалла очень высоки. Например, точность стабилизации диаметра сцинтилляционного монокристалла диаметром 250 мм должна быть 1...2 %.

Исследования процесса выращивания СМК показывают, что процесс роста монокристалла по

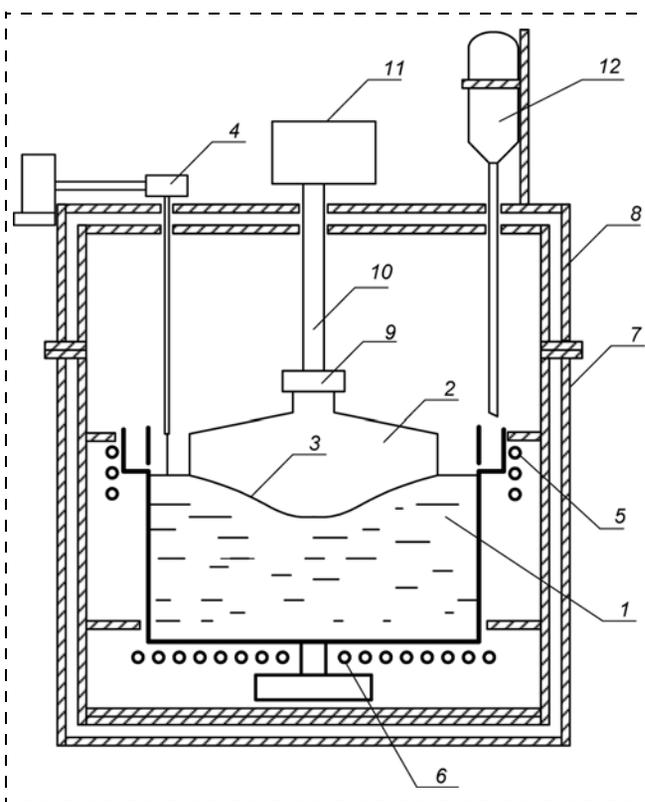


Рис. 1. Схема установки "РОСТ":

1 — тигель с расплавом; 2 — растущий кристалл; 3 — фронт кристаллизации; 4 — датчик уровня (уровнемер) с электроконтактным щупом; 5 — боковой нагреватель; 6 — донный нагреватель; 7 — нижний охлаждаемый полукорпус; 8 — верхний охлаждаемый полукорпус; 9 — кристаллодержатель; 10 — шток кристаллодержателя; 11 — редуктор системы вращения и вытягивания штока кристаллодержателя; 12 — система подпитки расплава

высоте можно условно разбить на несколько интервалов, в пределах которых процесс кристаллизации является квазистационарным. Это позволяет использовать на этих интервалах выращивания модальные регуляторы. Параметризация процесса выращивания как объекта управления (ОУ) проводилась на примере получения монокристаллов CsI. Процесс выращивания рассматривался как двумерный линейный стационарный объект управления с двумя входами (температура донного (основного) нагревателя T_d и температура бокового (дополнительного) нагревателя T_b и двумя выходами (диаметр кристалла D_s и температура подпиточного расплава T_p). На одном из интервалов роста монокристалла в длину модель ОУ в отклонениях от установившегося режима в пространстве состояний имеет следующие матрицы:

$$A = \begin{bmatrix} -3,628 & -1,018 & -0,339 & 0,123 & -0,537 \\ 1,038 & -0,707 & 0,585 & 0,413 & -0,443 \\ 0,263 & 0,865 & -2,299 & -0,732 & -0,363 \\ 0,191 & -0,436 & 0,659 & -0,456 & 0,063 \\ -0,533 & 0,432 & 0,375 & 0,597 & -2,261 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 4,738 & -5,711 \\ 0,033 & 1,219 \\ -1,747 & -1,157 \\ 0,088 & 0,330 \\ 0,428 & -0,359 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} -7,409 & -0,846 & -0,427 & 0,112 & -0,557 \\ 0,411 & 0,879 & -2,051 & -0,329 & -0,040 \end{bmatrix}.$$

Объект управления полностью управляем и наблюдаем.

Требования к переходному процессу в канале "температура T_d основного нагревателя — диаметр кристалла D_s ":

- длительность переходного процесса не более 5 с;
- перерегулирование менее 15 %.

Синтез модального регулятора по состоянию

Анализ. В табл. 1 для ОУ приведен спектр (собственные значения λ_i) и меры модального доминирования собственных значений по управляемости и наблюдаемости по каналу выхода — диаметру кристалла D_s , вычисленные по выражениям (2) и (3). Собственные числа в табл. 1 размещены в порядке убывания мер их модальной наблюдаемости (оцениваемые как меры модальной управляемости дуальной динамической системы). На первом месте позиционируется наиболее управляемая и наблюдаемая мода. Из таблицы следует, что первая мода диспропорционально доминирует.

Синтез. Синтез регулятора проводили итерационным методом с использованием сетевого ресурса Java-MATLAB (<http://mathscinet.ru>). Выбрали коэффициент сжатия спектра $s = 0,001$. При синтезе необходимо на каждом шаге итерации повторять рас-

чет, организуя перебор точек спектра, выбирая парные комплексно сопряженные числа и вычисляя матрицу K как сумму матриц одиночных перемещений вещественных и парных перемещений комплексных собственных значений, но с учетом сопряжений. На промежуточных стадиях возможно появление комплексных значений K , поэтому необходимо овеществлять K после перемещения всех собственных значений, фиксируя итог. В общем, при итерациях тянуть на комплексной плоскости влево имеет смысл и быстрые, и медленные моды, но в рассматриваемой модели между ними и без того велика разница, поэтому есть смысл ограничивать слева перемещения мод и не давать быстрым и медленным модам сближаться, что легко сделать контролем перемещения. Следовательно, при итерациях необходимо определять собственные значения замкнутой системы λ_{zui} и контролировать расстояние между ними $d_i = \lambda_{zui} - \lambda_{zu(i-1)}$, умножая его при расчетах на сопряженное значение.

Спектральная задача связана, с одной стороны, с перемещением собственных значений и, с другой стороны, с ограничением этих перемещений, когда сместить можно, но уже не нужно. Например, вводят трапециевидные зоны, где имеет смысл находиться собственным значениям замкнутой системы. Задача размещения собственных значений неоднозначна. Можно не вводить явно ограничения, а ввести метрику комплексной плоскости w для того, чтобы ограничить смещение собственных значений не ввиду физической невозможности, а ввиду ненужности. Метрику задают обычно квадратичной формой, которая представляет собой весовой коэффициент при расстоянии: чем дальше от нуля, тем выше коэффициент w . Поэтому при итерационном методе синтеза используется шаг sw , т. е. имеем на i -м шаге

$$K = K + K_i sw_i, \quad i = 1, \dots, n. \quad (8)$$

Для нахождения матрицы обратных связей K использовали выражения (6), (7) и (8):

$$K = \begin{bmatrix} 0,0698 & 0,0138 & 0,0313 & 0,1475 & -0,0179 \\ -0,0966 & -0,0737 & -0,0452 & -0,0366 & 0,0496 \end{bmatrix}.$$

Фробениусова норма матрицы K равна 0,20. Затраты модального регулятора, оцениваемые, в нашем случае, нормой матрицы обратных связей, в общем складываются из затрат на изменение темпов (модули собственных значений) и формы траекторий (собственные векторы). Поэтому при синтезе модального управления многосвязной системой одна из осмысленных и вполне достижимых целей состоит в сближении собственных векторов матриц A и Q , что отвечает естественной цели получить реализуемый на практике регулятор.

В табл. 2 приведен спектр и меры управляемости для замкнутой системы.

Таблица 1

Собственные значения и меры модального доминирования по управляемости μ_u и наблюдаемости μ_v ОУ

Мера доминирования	Собственные значения λ_i				
	-3,65	-1,35 + 0,60j	-1,35 - 0,60j	-2,18	-0,81
μ_u	51,95	16,01	16,01	10,37	2,19
μ_v	51,04	14,79	14,79	0,00	0,00

Таблица 2

Собственные значения и меры модального доминирования по управляемости μ_u замкнутой системы

Мера доминирования	Собственные значения λ_i				
	-4,12	-1,51 + 0,58j	-1,51 - 0,58j	-2,29	-0,68
μ_u	66,13	12,7	12,7	8,43	0,97

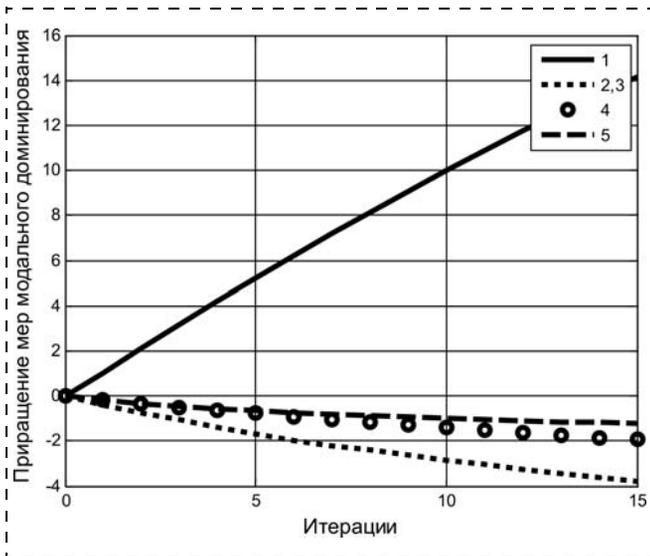


Рис. 2. Приращение мер модального доминирования по управляемости собственных значений $\lambda_1 \dots \lambda_5$ в замкнутой системе

Сравнение спектра и мер модального доминирования по управляемости для ОУ и замкнутой системы показывает, что синтез изменил все собственные значения объекта управления и их меры доминирования. Увеличилась и доминирует мера модального доминирования по управляемости собственного значения λ_1 . Меры доминирования остальных собственных значений упали, что хорошо видно на рис. 2, где приведено приращение (в безразмерных единицах) мер доминирования по управляемости собственных значений $\lambda_1, \dots, \lambda_5$ в процессе синтеза. Общая картина такая, что доминанта активно смещается влево, а влияние остальных тонов уменьшается. Подтянутая влево мода, мало того, что сокращает время переходного процесса, но и начинает доминировать в нем.

На рис. 3 приведены переходные характеристики ОУ и замкнутой системы (ЗС) в относительных единицах (о. е.) по каналу "температура донного нагревателя T_d — диаметр кристалла D_s ".

Длительность переходного режима для объекта управления составляет 5 с, для замкнутой системы — 3 с. Это стандартное отображение качества управления при нулевых начальных условиях для инерционных ОУ, какими является процесс выращивания СМК, позволяет сделать вывод, что синтезированный регулятор может быть использован для управления выращиванием этих монокристаллов.

Выводы

Для многосвязного процесса выращивания крупногабаритных СМК в статье проведен синтез в пространстве состояний модального регулятора с опорой на метод модального доминирования при итерационном смещении собственного спектра

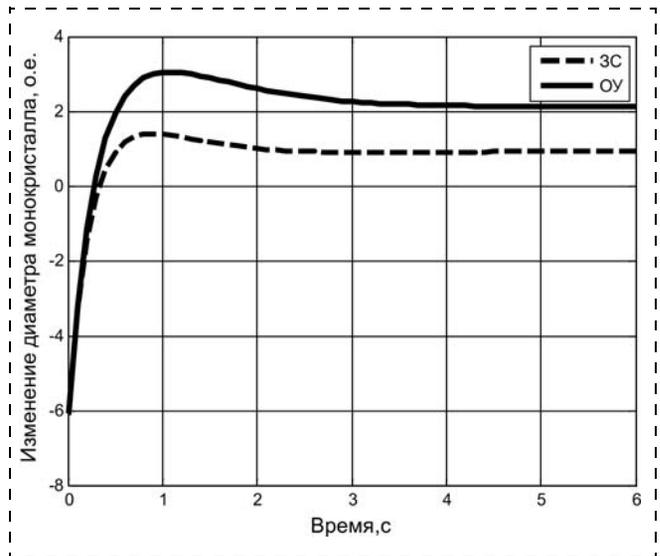


Рис. 3. Переходные характеристики объекта управления и замкнутой системы

объекта управления. Модальный синтез проводился в собственном базисе.

Длительность переходного процесса в замкнутой системе, составляющая 3 с и перерегулирование 12 %, показывают, что синтезированная система удовлетворяет требованиям к качеству управления при выращивании СМК. Следует подчеркнуть, что в производственных условиях процесс выращивания подвержен действию кратковременных возмущений тепловых условий, а это может привести к неравномерному распределению (захвату) активатора по длине кристалла. Этот процесс резко ухудшает качество монокристалла. Замкнутая система с синтезированным регулятором имеет в канале управления диаметром монокристалла быстрое доминирующее собственное значение $\lambda_1 = -4,12$ с $\mu_{u1} = 66,13$ (см. табл. 2), что позволяет замкнутой системе отреагировать на такое возмущение и уменьшить его влияние на качество кристалла.

Проведенный синтез показывает, что адаптация собственного пространства у динамических систем оправдана: ни спектр, ни собственные векторы не стоит менять без особой на то нужды, что означает привлечение анализа на первой стадии процедуры синтеза. Показано, что аналитическое решение задачи возможно как при разовой, так и при итерационной подвижке собственных значений одного за другим, когда можно оценить меру модального доминирования каждого собственного значения и норму матрицы обратных связей модального регулятора при одиночном изменении спектра [2]. Суть итерационной процедуры состоит в том, что она "редуцирует" систему автоматически: чем меньше мера доминирования, тем менее влияние на нее.

Список литературы

1. **Горелецкий В. И., Гринев Б. В., Заславский Б. Г., Смирнов Н. Н., Суздаль В. С.** Рост кристаллов. Харьков: АСТ, 2002. 535 с.
2. **Балонин Н. А.** Новый курс теории управления движением. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2000. 160 с.
3. **Kalman R. E., Ho Y. C., Narendra K. S.** Controllability of linear dynamical systems // *Contrib. Differ. Equations*. 1962. Vol. 1 (2). P. 189—213.

4. **Wonham W. M.** On Pole Assignment in Multi-Input Controllable Linear Systems // *IEEE Trans. Aut. Contr.* 1967. Vol. AC-12, No. 6. P. 660—665.
5. **Simon D. D., Mitter S. K.** Theory of Modal Control // *Inform. Contr.* 1968. Vol. 13. P. 316—353.
6. **Ackermann J.** Der Entwurf Linearer Regelungssysteme im Zustandsraum / J. Ackermann // *Regelungstechnik und Prozessdatenverarbeitung*. 1972. Vol. 7. P. 297—300.
7. **Van der Woude J. W.** A note on pole placement by static output feedback for single input systems // *Systems & Control Letters*. 1988. V. 11. P. 285—287.

Modal Control Synthesis in Single Crystal Growth Systems

N. A. Balonin, korbendfs@mail.ru✉,
State University of Airspace Instrumentation, St.-Petersburg, 190000, Russian Federation,
V. S. Suzdal, suzdal@isma.kharkov.ua, **Yu. S. Kozmin**, ukoz55@mail.ru,
V. N. Tonkoshkur, vladimir-t63@mail.ru,
Institute for Scintillation Materials, NAS of Ukraine, Kharkov, 61001, Ukraine

Corresponding author: Balonin Nikolay A., Doctor of Engineering, Associate Professor, State University of Airspace Instrumentation, St.-Petersburg, 190000, Russian Federation, Phone: (812) 494-70-44 (office), +7 (911) 213-59-07 (mobile); e-mail: korbendfs@mail.ru

Received on April 24, 2014
Asseped September 24, 2014

For multi-connected process of scintillation of the single crystal growth, a synthesis of modal controller was carried out. Modal control is defined as the control, which solves the problem of selection of the dynamic system's eigenspace. The spectrum selection for the multi-connected systems results in an unpleasant problem of manipulation of a big number of eigenvalues, which significantly complicates the process of studying their influence on the behavior of a dynamic system. The main problem of a practical modal synthesis consists in an excessive number of the parameters affecting the systems with different properties. The synthesis was carried out on the basis of the modal dominance measures, which reduce the choice of many eigenvalues to selection of one or more parameters describing the spectrum compression. Modal dominance measures give a formal assessment of the eigenvalues' mobility and allow us to control quantitatively the spectrum change trends during the synthesis. It was demonstrated that an analytical solution to the problem was possible both with a single and iterative shifting of the eigenvalues, one after another, when it was possible to estimate the modal dominance measure of each eigenvalue and the rate of the modal controller feedback gain matrix with a single spectrum change. The parameters of the transition process in a closed system of the single crystal growth control show that the synthesized system meets the requirements for a quality control. It is known that in the production conditions the growth process is exposed to the transient conditions of the thermal perturbations, which may result in inhomogeneous distribution of the activator within the length of the crystal. This process impairs the single crystal's quality. A closed system with a synthesized regulator has a quick dominant eigenvalue in the channel of the single crystal diameter control, which allows the closed system to respond to such a perturbation and reduce its impact on the crystal's quality. The synthesis emphasizes the main idea that adaptation of the eigenspace in the dynamic systems is justified. It should only be carried out with the involvement of the analysis at the first stage of the synthesis procedure.

Keywords: modal control, modal dominance, single crystal growth control

For citation:

Balonin N. A., Suzdal V. S., Kozmin Yu. S., Tonkoshkur V. N. Modal Control Synthesis in Single Crystal Growth Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 7, pp. 443—448.

DOI: 10.17587/mau.16.443-448

References

1. **Goreletskii V. I., Grinev B. V., Zaslavskii B. G., Smirnov N. N., Suzdal' V. S.** *Rost kristallov* (Crystal growth), Khar'kov, AST, 2002, 535 p. (in Russian).
2. **Balonin N. A.** *Novyyi kurs teorii upravleniya dvizheniem* (New course of the theory of motion control), St. Petersburg, Publishing House of St. Petersburg university, 2000, 160 p. (in Russian).
3. **Ralman R. E., Ho Y. C., Narendra K. S.** Controllability of linear dynamical systems, *Contrib. Differ. Equations*, 1962, vol. 1 (2), pp. 189—213.
4. **Wonham W. M.** On Pole Assignment in Multi-Input Controllable Linear Systems, *IEEE Trans. Aut. Contr.*, 1967, vol. AC-12, no. 6, pp. 660—665.
5. **Simon D. D., Mitter S. K.** Theory of Modal Control, *Inform. Contr.*, 1968, vol. 13, pp. 316—353.
6. **Ackermann J.** Der Entwurf Linearer Regelungssysteme im Zustandsraum, *Regelungstechnik und Prozessdaten Verarbeitung*, 1972, vol. 7, pp. 297—300.
7. **Van der Woude J. W.** A note on pole placement by static output feedback for single input systems, *Systems & Control Letters*, 1988, vol. 11, pp. 285—287.

М. В. Бобырь, д-р техн. наук, доц., fregat_mn@rambler.ru,
Юго-Западный государственный университет

Адаптация системы управления мобильным роботом на основе нечеткой логики*

Рассмотрен процесс адаптации системы управления мобильным роботом, использующейся для осуществления его перемещения вдоль линии. Адаптация реализуется сочетанием двух методов. Первый метод заключается в варьировании параметров треугольных функций принадлежности и структуры нечетких правил, используемых для описания входных и выходных переменных нечеткой системы управления роботом. Вторым методом является изменение структуры программного кода, который используется для управления мобильным роботом. Приведены результаты экспериментальных исследований, оценивающих время перемещения мобильного робота вдоль линии по овалному треку.

Ключевые слова: нечеткая система вывода, мобильный робот, система управления, RMSE, мягкие вычисления, мягкие арифметические операции

Введение

В настоящее время известно множество подходов, использующих для управления перемещением мобильных роботов нечетко-логические системы [1, 2]. Традиционными подходами к синтезу нечетких систем управления являются модели приближенных рассуждений Мамдани и Такаги — Сугэно [3, 4]. К основным задачам относятся не только построение нечетких систем, но и нахождение таких режимов, при которых должны наблюдаться наилучшие варианты решения поставленных задач управления. Одним из вариантов нахождения оптимальных режимов функционирования нечетких систем является использование в структуре нечеткого вывода мягких арифметических операций [5]. Другим эффективным подходом является нахождение оптимального числа нечетких правил, задающих взаимосвязь между входными и выходными параметрами [6]. В статье приведен анализ разработки и настройки нечеткой системы управления для перемещения мобильного робота вдоль линии.

Нечетко-логическая модель для системы управления роботом

Нечеткость в системе управления мобильным роботом возникает при разработке программного кода, использующегося для управления мобильным роботом. Рассмотрим переменные, которые необходимо учитывать в системе управления мобильным роботом при назначении режимов, связанных с его перемещением. Во-первых, затруднение возникает при назначении переменной *Speed*, определяющей скорость движения робота, численное значение которой посредством широтно-импульсной модуля-

ции передается на микромоторы мобильного робота. Диапазон значений переменной *Speed* $\in [0...255]$. Данный интервал ограничен имеющимся у микроконтроллера встроенным аналого-цифровым преобразователем размерностью 8 бит. Следует отметить, что чем больше значение этой переменной, тем быстрее робот будет перемещаться по заданной траектории. Однако при скорости больше 160 единиц на крутых поворотах возможны вылеты робота с трассы. Данная ситуация возникает из-за того, что цифровые датчики линии обладают малой чувствительностью. Вместе с тем, если $Speed < 60$, то микродвигатели робота вращаться не будут. Поэтому назначение параметра *Speed* носит неопределенный характер и в большинстве случаев он подбирается экспериментально.

Во-вторых, на значение параметра *Speed* оказывает влияние напряжение питания *u*, от которого питается мобильный робот. Например, робот может питаться от длинного провода, и тогда его масса *m* не изменяется. Однако если на мобильный робот подается питание от батареек 9V типа (6F22), то масса робота увеличивается. Робот может питаться и от батареек 1,5 V типа (AA-R6BE), при этом масса робота также увеличивается. Неоднозначность в данном случае возникает вследствие того, что чем больше напряжение питания, тем быстрее робот будет перемещаться по треку. Масса робота также оказывает влияние на скорость перемещения по треку: при уменьшении массы робота его скорость возрастает. С учетом вышеуказанного синтезируем нечеткую MISO-систему управления мобильным роботом. На ее входе имеются две входные переменные: *u* — напряжение питания и *m* — масса робота. На выходе управляющимся параметром является величина *Speed*, значение которой передается на микромоторы робота.

* Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МД-2983.2015.8.

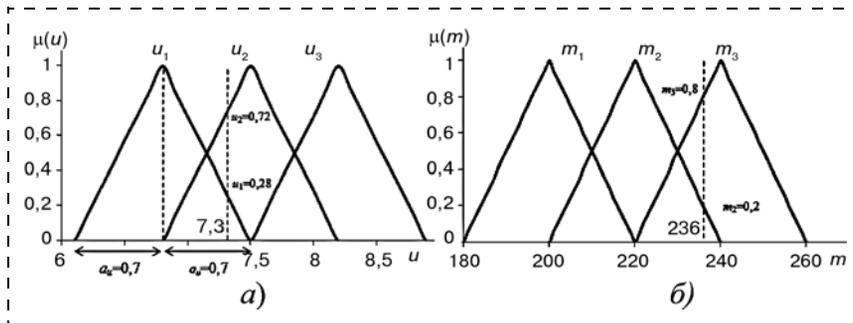


Рис. 1. Графики треугольных функций принадлежности: а — входная переменная — напряжение питания u ; б — входная переменная — масса робота m

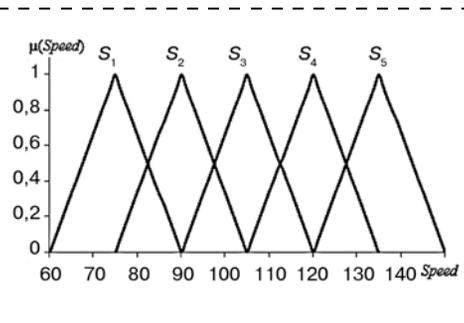


Рис. 2. График выходной функции принадлежности скорость вращения $Speed$

Алгоритм нечетко-логического вывода состоит из последовательной реализации семи шагов.

Шаг 1. Фазаификация входных переменных. Входными параметрами для управления мобильным роботом при перемещении его вдоль линии являются:

- напряжение питания — u (В);
- масса робота — m (г).

Вследствие того, что на микромоторы робота подается напряжение в диапазоне от 6 до 9 В, будем использовать этот диапазон значений для формирования треугольной функции принадлежности $U = [u_1] + [u_2] + [u_3]$ (рис. 1, а). Для построения треугольной функции принадлежности, описывающей массу мобильного робота, $M = [m_1] + [m_2] + [m_3]$ используем диапазон от минимального до максимального значения, т. е. от 180 г (без дополнительного груза) до 270 г (с батареями) (рис. 1, б).

В общем виде треугольная функция принадлежности записывается в виде

$$f(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a; \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b; \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c; \\ 0, & c \leq x, \end{cases} \quad (1)$$

где a, b, c — параметры функции принадлежности; x — количественное значение входного параметра по оси абсцисс.

Выходная переменная $Speed$, которая задает скорость вращения микромоторов, также имеет треугольную функцию принадлежности $Speed = [s_1] + [s_2] + [s_3] + [s_4] + [s_5]$ и задается в диапазоне [0...255] (рис. 2).

На рис. 1 и 2 видно, что параметры, используемые для изменения ширины оснований функций принадлежности, равны соответственно

- для входной переменной u — $a_u = 0,7$;
- для входной переменной m — $a_m = 20$;
- для выходной переменной S — $a_s = 15$.

Шаг 2. Определение степеней принадлежности. К примеру, на входе нечеткой системы имеется следующая информация: $u = 7,3$ (В) и $m = 236$ (г) (рис. 1, а, б):

$$\begin{aligned} u &= (u_1, u_2, u_3) = (0,28; 0,72; 0); \\ m &= (m_1, m_2, m_3) = (0; 0,2; 0,8). \end{aligned} \quad (2)$$

Шаг 3. Синтез базы знаний, содержащих нечеткие правила (НП) вида "Если...То" (табл. 1) [7–9].

Шаг 4. Построение матрицы нечетких отношений. При составлении матрицы нечетких отношений был учтен подход, предложенный в работах [10, 11]. Так как в структуре нечеткого вывода используются операции взятия нечеткого минимума и максимума, то в статье рассмотрим использование в системе управления роботом как жестких, так и мягких арифметических операций [12] (табл. 2).

С учетом этих формул матрица нечетких отношений представлена в табл. 3.

Шаг 5. Усечение термов выходной переменной

$$\mu(s)_i' = \text{soft} - \min_{i=1}^n (s'_i; \mu(s)), \quad (3)$$

где $i = 1, \dots, n$ — номер заключения нечетко-логического вывода; n — число заключений нечетко-логического вывода; $\text{soft} - \min$ — операция мягкого минимума [5].

Шаг 6. Объединение усеченных термов выходной переменной

$$\begin{aligned} \mu(s)' &= \\ &= \text{soft} - \max_{i=1}^n [\mu'(s)_1; \mu'(s)_2; \mu'(s)_3; \mu'(s)_4; \mu'(s)_5], \end{aligned} \quad (4)$$

где $\text{soft} - \max$ — операция мягкого максимума [5].

Таблица 1

База знаний для системы управления мобильным роботом

НП	Если	То	НП	Если	То	НП	Если	То
НП ₁	u_1	m_1	НП ₄	u_2	m_1	НП ₇	u_3	m_1
НП ₂	u_1	m_2	НП ₅	u_2	m_2	НП ₈	u_3	m_2
НП ₃	u_1	m_3	НП ₆	u_2	m_3	НП ₉	u_3	m_3

Формулы арифметических операций

Жесткие операции	Мягкие операции
$\min(x_1, x_2) = \frac{x_1 + x_2 - (x_1 - x_2)\text{sgn}(x_1 - x_2)}{2},$ <p>где x_1 и x_2 — количественные характеристики, рассчитанные с учетом формулы 2; sgn — оператор разности определяется как</p> $\text{sgn}(x_1 - x_2) = \begin{cases} -1, & \text{если } x_1 - x_2 < 0; \\ 0, & \text{если } x_1 - x_2 = 0; \\ 1, & \text{если } x_1 - x_2 > 0. \end{cases}$	<p>Мягкий минимум:</p> $\text{soft-min}(x_1, x_2) = \frac{x_1 + x_2 + \delta^2 - \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + \delta^2}}{2},$ <p>где $\delta = 0,05$. Мягкий максимум: $\text{soft-max}(x_1, x_2) = \gamma \cdot \max(x_1, x_2) + 0,5(1 - \gamma)(x_1 + x_2) ,$ <p>где γ — оператор параметризации, при $\gamma = 1$ формула сводится к операции жесткого максимума, при $\gamma = 0$ формула сводится к операции среднего арифметического (MEAN)</p> </p>

Матрица нечетких отношений

Выходной терм	Композиция			Максимум
s'_5	$b_1 = \text{soft-min}(u_1; m_1)$			b_1
s'_4	$b_2 = \text{soft-min}(u_1; m_2)$	$b_4 = \text{soft-min}(u_2; m_1)$		$\text{soft-max}(b_2, b_4)$
s'_3	$b_3 = \text{soft-min}(u_1; m_3)$	$b_5 = \text{soft-min}(u_2; m_2)$	$b_7 = \text{min}(u_3; m_1)$	$\text{soft-max}(b_3, b_5, b_7)$
s'_2	$b_6 = \text{soft-min}(u_2; m_3)$	$b_8 = \text{soft-min}(u_3; m_2)$		$\text{soft-max}(b_6, b_8)$
s'_1	$b_9 = \text{soft-min}(u_3; m_3)$			b_9

Шаг 7. Дефаззификация на основе метода центра тяжести [13–16]

$$S_y = \frac{\sum_{i=1}^n s_i \mu(s)_i'}{\sum_{i=1}^n \mu(s)_i'} \quad (5)$$

Формулы (1)–(5) формируют нечеткий алгоритм для системы управления мобильным роботом.

Структурная модель мобильного робота и принцип его работы

Экспериментальная модель мобильного робота, реализованная для его перемещения вдоль линии, представлена на рис. 3, а.

В данной экспериментальной модели робота используются следующие компоненты: двухколес-

ная платформа miniQ, включающая монтажную платформу DFRobot, пару колес 42 × 19 мм и два микромотора шириной 12 мм с редуктором; два цифровых датчика линии; аппаратно-программную платформу ArduinoUno; плату расширения для Arduino на базе чипа L298P Motor Shield (два канала, 2 А); пассивную плату расширения TroykaShield, позволяющую присоединять датчики к микроконтроллеру.

Цифровые датчики линии используются для интеллектуализации процесса управления роботом. Так, датчики выдают логический ноль, когда под роботом черная поверхность, и логическую единицу в противоположном случае. Чтобы робот перемещался прямо по треку (рис. 3, б), два сенсора должны показывать логические единицы или нули. При повороте направо правый сенсор при заезде на трек показывает логический ноль. При повороте налево левый сенсор при заезде на трек показывает логи-

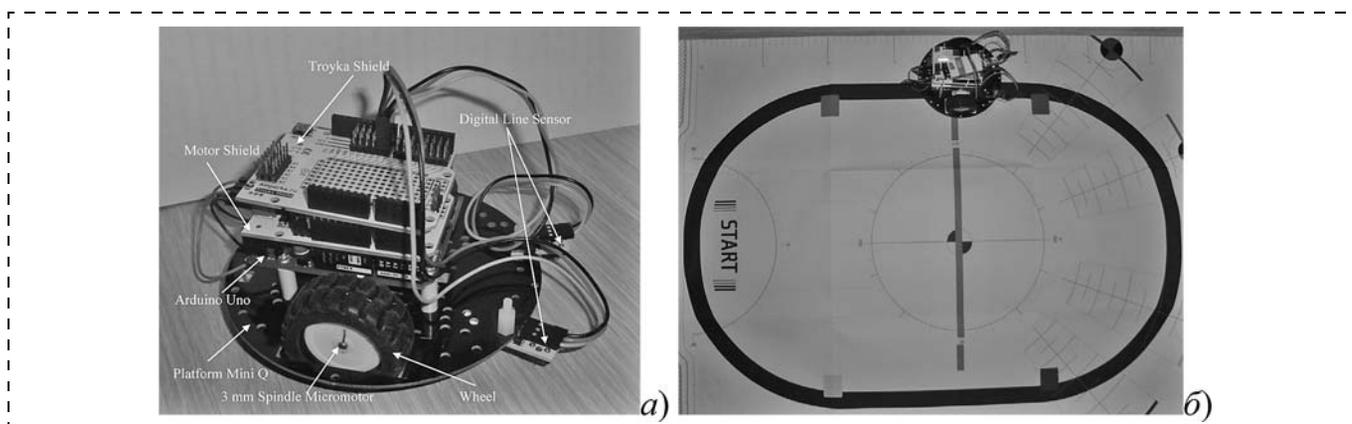


Рис. 3. Мобильный робот: а — экспериментальная схема; б — трек для перемещения робота

Таблица 4

**Состояние цифровых датчиков
и команды для управления роботом**

Левый датчик линии	Правый датчик линии	Команда
0	0	Вперед
0	1	Поворот налево
1	0	Поворот направо
1	1	Вперед

ческий ноль. В табл. 4 представлены возможные состояния датчиков и команды, которые необходимо отдать микроконтроллеру для того, чтобы он сформировал управляющее воздействие о перемещении робота.

Моделирование работы нечетко-логического вывода для управления мобильным роботом и экспериментальное исследование

На основе работы алгоритма нечетко-логического вывода, рассмотренного выше, были получены результаты, которые сведены в табл. 5 и 6.

Графическая интерпретация полученных результатов представлена на рис. 4 (см. третью сторону обложки).

Анализ результатов, представленных в табл. 5 и 6, а также на рис. 4, показывает, что для жесткой модели нечетко-логического вывода в табл. 6 (область,

выделенная серым цветом) характерна область нечувствительности робота. Если масса и напряжение питания робота будут иметь значения, диапазон которых выделен серым цветом в табл. 6, то робот не будет перемещаться вдоль трека. При использовании мягкого нечетко-логического вывода нечувствительность исключена.

Для оценки задачи обучения нечеткой базы знаний, синтезированной в первой части статьи, по выборке, представленной в табл. 1, осуществляется поиск вектора таких значений ψ , при которых среднеквадратическое отклонение будет минимально:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{w} \sum_{i=1}^w (S_d - S_{эт})^2} \rightarrow \min, \quad (6)$$

где w — число измерений в выборке; S_d — значения параметра *Speed*, полученные при реализации мягкого или жесткого нечетко-логического вывода; $S_{эт}$ — эталонная выборка параметра *Speed* (табл. 7).

С учетом формулы (6) были проведены расчеты среднеквадратического отклонения (*RMSE*) для данных, полученных при моделировании жесткой (см. табл. 6) и мягкой моделей (см. табл. 5) нечеткого вывода, и данных, соответствующих эталонной выборке (табл. 7). Для повышения достоверности результатов на основе данных эталонной выборки было сформировано уравнение регрессии: $S_{рег} = 123,75 - 0,085a_1 + 0,084a_2$. Расчет показателя *RMSE* приведен в табл. 8.

Таблица 5

Расчет параметра *Speed* на основе мягкой модели нечеткого вывода

<i>u</i>	<i>m</i>									
	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
6,1	105	135	135	127,5	105	82,5	75	75	105	105
6,4	105	135	134,94	127,7	120	112,71	104,92	105	105	105
6,7	135	134,99	134,96	127,64	120,01	112,68	104,98	105,03	135	135
7	129,38	131,7	132,35	124,85	117,47	109,64	102,33	101,57	129,38	129,38
7,3	120	127,15	126,77	119,77	111,75	104,32	96,43	96,81	120	120
7,6	90	116,6	117,34	109,63	102,31	94,21	87,24	86,49	90	90
7,9	86,54	111,97	111,61	104,33	96,44	88,89	81,5	81,84	86,54	86,54
8,2	75	104,95	105	97,49	90	82,36	75,03	75,04	75	75
8,5	75	104,99	105,03	97,5	90	82,35	75,02	75,01	75	75
8,8	105	105	105,14	97,54	90	82,28	75,04	75	105	105

Таблица 6

Расчет параметра *Speed* на основе жесткой модели нечеткого вывода

<i>u</i>	<i>m</i>									
	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
6,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6,4	0	135	135	127,5	120	112,5	105	105	0	0
6,7	0	135	135	127,5	120	112,5	105	105	0	0
7	0	131,57	132,27	124,53	117,27	109,53	102,27	101,57	0	0
7,3	0	127,02	126,64	119,34	111,64	104,34	96,64	97,02	0	0
7,6	0	116,57	117,27	109,53	102,27	94,53	87,27	86,57	0	0
7,9	0	112,02	111,64	104,34	96,64	89,34	81,64	82,02	0	0
8,2	0	105	105	97,5	90	82,5	75	75	0	0
8,5	0	105	105	97,5	90	82,5	75	75	0	0
8,8	0	105	105	97,5	90	82,5	75	75	0	0

Эталонная выборка параметра *Speed*

<i>u</i>	<i>m</i>									
	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
6,1	93	113	113	102	99	108	88	129	92	116
6,4	126	123	88	100	103	130	98	126	95	124
6,7	126	86	122	90	109	110	86	83	105	84
7	83	119	90	91	101	103	116	82	96	113
7,3	110	118	119	98	83	119	87	107	107	83
7,6	125	118	103	86	109	105	107	117	119	81
7,9	125	124	99	94	88	91	82	80	104	84
8,2	108	114	106	127	83	106	89	125	84	122
8,5	115	87	103	108	107	83	115	97	125	116
8,8	101	115	82	110	129	122	92	123	96	91

Анализ табл. 8 показывает, что при моделировании жесткой модели нечеткого вывода коэффициент имеет наибольшее значение $RMSE_{soft_fis}$ и в 2,7 раза хуже, чем при использовании мягкой модели нечеткого вывода.

Данные экспериментальных исследований перемещения мобильного робота вдоль трека длиной 2 м (см. рис. 3, б) приведены в табл. 9.

Анализ данных табл. 9 показал, что при использовании нечеткого вывода с жесткими арифметическими операциями в двух экстремальных случаях робот не реагирует на параметр *Speed* и не решает поставленную перед ним задачу. Для мягкой системы нечеткого вывода все серии опытов были удачными.

Однако для нечеткого вывода с мягкими арифметическими операциями при маленьком напряжении наблюдается слишком большое время, требуемое роботу для выполнения поставленной задачи. Для повышения времени прохождения роботом трека необходимо выполнить структурно-параметрическую адаптацию системы управления.

Структурно-параметрическая адаптация системы управления робота

Как было отмечено выше, минимизация времени, требуемого для выполнения роботом поставленной задачи, возможна за счет реструктуризации нечетких правил (см. табл. 1) и изменения параметров функции принадлежности (1).

Шаг А. Модифицируем структуру нечетких правил, использующихся для управления мобильного робота. Необходимо, чтобы при минимальных значениях напряжения и массы робота на выходе переменная *Speed* имела большее значение, чем 105 (табл. 9). Это возможно осуществить, если у НП 6, 8 и 9 изменить терм, на который они будут ссылаться (табл. 10). В табл. 10 модифицированные правила выделены серым цветом.

После этого проведем моделирование работы алгоритма нечетко-логического вывода с использованием как мягких, так и жестких арифметических операций. Результат работы нечеткого вывода показан на рис. 5 (см. третью сторону обложки). Значения коэффициента $RMSE$ для оценки точности нечеткого вывода приведены в табл. 11.

Таблица 8

Расчет показателя $RMSE$

$RMSE_{reg}$	$RMSE_{soft_fis}$	$RMSE_{hard_fis}$
14,56	67,12	24,52

Таблица 9

Перемещение мобильного робота по треку

№ опыта	Жесткий нечеткий вывод				Мягкий нечеткий вывод			
	<i>u</i> , В	<i>m</i> , г	<i>Speed</i>	<i>t</i> , с	<i>u</i> , В	<i>m</i> , г	<i>Speed</i>	<i>t</i> , с
1	6,1	180	—	—	6,1	180	105	27,61 26,15 27,27
2	7,5	220	105	10,29 10,85 10,66	7,5	220	105	9,93 10,45 10,42
3	9	260	—	—	9	260	105	11,08 10,35 10,32

Таблица 10

Модифицированные нечеткие правила

НП	Если	То	НП	Если	То	НП	Если	То			
НП ₁	<i>u</i> ₁	<i>m</i> ₁	<i>s</i> ₅	НП ₄	<i>u</i> ₂	<i>m</i> ₁	<i>s</i> ₄	НП ₇	<i>u</i> ₃	<i>m</i> ₁	<i>s</i> ₃
НП ₂	<i>u</i> ₁	<i>m</i> ₂	<i>s</i> ₄	НП ₅	<i>u</i> ₂	<i>m</i> ₂	<i>s</i> ₃	НП ₈	<i>u</i> ₃	<i>m</i> ₂	<i>s</i> ₄
НП ₃	<i>u</i> ₁	<i>m</i> ₃	<i>s</i> ₃	НП ₆	<i>u</i> ₂	<i>m</i> ₃	<i>s</i> ₄	НП ₉	<i>u</i> ₃	<i>m</i> ₃	<i>s</i> ₅

Таблица 11

Расчет показателя $RMSE$ после модификации структуры нечетких правил

$RMSE_{reg}$	$RMSE_{soft_fis}$	$RMSE_{hard_fis}$
14,56	67,4	21,19

Анализ рис. 5 и табл. 11 показывает, что значение *Speed* увеличилось практически для всех диапазонов значений переменной *m* и *u*. Однако показатель $RMSE$ уменьшился только для нечеткой системы, использующей мягкие арифметические операции. Для жесткой нечеткой системы наблюдается увеличение $RMSE$.

Шаг Б. Изменим параметр a (см. рис. 1, a) функций принадлежности для входных и выходных переменных нечеткой системы управления. Результат моделирования приведен в табл. 12.

Графики, интерпретирующие полученные в табл. 12 результаты, представлены на рис. 6 (см. третью сторону обложки).

Основной вывод из полученных результатов следующий: при структурно-параметрической адаптации жесткие решения дают результат, сопоставимый с мягкими операциями. Данный вывод основан на численном моделировании нечеткой системы и расчете показателя $RMSE$. С учетом структурно-параметрической адаптации было проведено новое экспериментальное исследование перемещения мобильного робота по треку, результаты которого представлены в табл. 13.

Как видно из приведенных в табл. 13 данных, время, необходимое для перемещения мобильного робота по треку, во всех случаях снизилось. При

этом нечеткая система, использующая жесткие арифметические операции, не имеет зон нечувствительности, что значительно увеличивает ее запас устойчивости [17–22].

Шаг В. Программная адаптация. В случаях, когда робот движется по прямой трека, он может делать ускорение. Для этого к текущей скорости робота прибавляется переменная $Speed_Step$. Результаты перемещения робота после программной адаптации приведены в табл. 14.

Анализ табл. 13 и 14 показал, что при программной адаптации наблюдается увеличение скорости робота и, как следствие, уменьшение времени, необходимого для перемещения робота по треку.

Заключение

Экспериментальные исследования, приведенные в статье, показали, что мягкие арифметические операции без настройки алгоритма нечеткого вывода позволяют с более высоким качеством управлять мобильным роботом. Так, экспериментально установлено, что без использования методов адаптации при жестких вычислениях $RMSE = 67,12$, а при мягких вычислениях $RMSE = 24,52$, т. е. точность мягкой нечеткой системы в 2,7 раза лучше по сравнению с жесткой системой управления. Однако при использовании методов структурно-параметрической и программной адаптации точность жесткой системы управления повышается и уже сопоставима с мягкой системой управления. Так, после структурно-параметрической адаптации для мягкой и жесткой нечеткой системы управления $RMSE = 20,5$. Следует заметить, что сложность вычислений при использовании жесткого нечеткого вывода снижается, что увеличивает оперативность процесса принятия управляющих решений. Примеры структурно-параметрической адаптации с поясняющими иллюстрациями детально рассмотрены в статье.

Список литературы

1. Шербатов И. А., Проталинский И. О., Бородин В. А. Система интерпретирования голосовых команд для управления мобильным роботом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 6. С. 14–18.
2. Majid Moradi Zirkohi, Mohammad Mehdi Fateh, Mahdi Aliyari Shoorehdeli. Type-2 Fuzzy Control for a Flexible — joint Robot Using Voltage Control Strategy // International Journal of Automation and Computing. 2013. Vol. 10, Iss. 3. P. 242–255.
3. Нусратов О. К., Джафаров П. С., Зейналов Э. Р., Мустафаева А. М., Джафаров С. М. Аналитический метод синтеза регулятора с нечеткой TS-моделью для управления манипулятором робота с гибким соединением // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 8. С. 10–14.
4. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление: Пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 798 с.
5. Бобырь М. В., Титов В. С., Акульшин Г. Ю. Моделирование нечетко-логических систем управления на основе мягких арифметических операций // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2013. № 3. С. 29–35.
6. Бобырь М. В., Титов В. С., Акульшин Г. Ю. Влияние числа правил на обучение нечетко-логической системы // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2014. № 11 (125). С. 28–35.
7. Титов В. С., Бобырь М. В., Анциферов А. В. Адаптивный мультисетевой алгоритм нечетко-логического вывода в задачах

Таблица 12

Расчет показателя $RMSE$ при изменении параметра ФП

Параметры ФП	$RMSE_{soft_fis}$	$RMSE_{hard_fis}$
$a_u = 0,8; a_m = 25; a_s = 20$	22,21	38,68
$a_u = 0,9; a_m = 30; a_s = 25$	21,34	38,26
$a_u = 1; a_m = 35; a_s = 25$	20,48	20,44

Таблица 13

Перемещение мобильного робота по треку после структурно-параметрической адаптации

№ опыта	Жесткий нечеткий вывод				Мягкий нечеткий вывод			
	$u, В$	$m, г$	$Speed$	$t, с$	$u, В$	$m, г$	$Speed$	$t, с$
1	6,1	180	130	7,41 7,80 7,60	6,1	180	130	7,41 7,80 7,60
2	7,5	220	112	5,87 5,80 5,79	7,5	220	112	5,87 5,80 5,79
3	9	260	130	3,61 4,33 4,29	9	260	130	3,61 4,33 4,29

Таблица 14

Перемещение мобильного робота по треку после программной адаптации

№ опыта	Жесткий нечеткий вывод				Мягкий нечеткий вывод			
	$u, В$	$m, г$	$Speed$	$t, с$	$u, В$	$m, г$	$Speed$	$t, с$
1	6,1	180	130	7,65 7,33 7,38	6,1	180	130	7,65 7,33 7,38
2	7,5	220	112	5,31 5,43 5,42	7,5	220	112	5,31 5,43 5,42
3	9	260	130	3,12 4,07 3,35	9	260	130	3,12 4,07 3,35

управления оборудованием с ЧПУ // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 5. С. 18—23.

8. Емельянов С. Г., Титов В. С., Бобырь М. В. Адаптивные нечетко-логические системы управления. М.: АРГАМАК-МЕДИА, 2013. 184 с.

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

10. Емельянов С. Г., Бобырь М. В., Анциферов А. В. Алгоритм самообучения адаптивных нейро-нечетких систем на основе мягких вычислений // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. Т. 11. № 8. С. 003—009.

11. Титов В. С., Бобырь М. В., Беломестная А. Л. Интеллектуальная система управления подачей при обработке деталей резанием // Промышленные АСУ и контроллеры. 2010. № 8. С. 17—20.

12. Емельянов С. Г., Титов В. С., Бобырь М. В. Интеллектуальные системы на основе нечеткой логики и мягких арифметических операций: Учеб. пособие. М.: АРГАМАК-МЕДИА, 2014. 341 с.

13. Бобырь М. В., Титов В. С., Беломестная А. Л. Стабилизация теплового режима в процессе резания // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 6. С. 38—41.

14. Бобырь М. В., Титов В. С. Метод коррекции параметров режима резания в системах с ЧПУ // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 7. С. 49—53.

15. Бобырь М. В., Титов В. С., Милостная Н. А., Глобин П. В. Оценка достоверности при моделировании нечетко-логических систем // Промышленные АСУ и контроллеры. 2012. № 7. С. 32—38.

16. Бобырь М. В. Модернизация АСУ оборудованием с ЧПУ на основе аппарата нечеткой логики // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2010. № 2. С. 40—43.

17. Титов В. С., Бобырь М. В., Милостная Н. А., Бобовников Н. Ю. Устройство для обработки деталей на оборудовании с ЧПУ. Патент РФ на изобретение № 2309034.

18. Титов В. С., Бобырь М. В., Милостная Н. А. Устройство высокоточной обработки деталей на оборудовании ЧПУ. Патент РФ на изобретение № 2280540.

19. Титов В. С., Бобырь М. В., Яхонтова Е. С. Способ и устройство управления точностью обработки деталей. Патент РФ на изобретение № 2379169.

20. Титов В. С., Бобырь М. В., Милостная Н. А. Устройство управления точностью обработки деталей. Патент РФ на изобретение № 2288809.

21. Титов В. С., Бобырь М. В., Милостная Н. А. Анализ систем управления машиностроительным оборудованием // Промышленные АСУ и контроллеры. 2009. № 2. С. 3—4.

22. Бобырь М. В., Емельянов С. Г., Милостная Н. А. О некоторых свойствах моделирования адаптивных нейронечетких систем на основе упрощенного нечетко-логического вывода // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2014. Т. 12. № 5. С. 4—12.

Adaptation of the Mobile Robot Control System Based on Fuzzy Logic

M. V. Bobyr, fregat_mn@rambler.ru, South-West State University, Kursk, 305040, Russian Federation

Corresponding author: Bobyr Maxim V., D. Sc., Professor, South-West State University, Kursk, 305040, Russian Federation, e-mail: fregat_mn@rambler.ru, email_b@mail333.com

Received on March 23, 2015

Accepted April 16, 2015

The article is devoted to the process of adaptation of the control system of a mobile robot for its movement along a line. To this end, the article proposes a fuzzy logic and structural model for robot control, combining two methods of adaptation. The first method consists in variation of the parameters of the triangular membership functions and structure of the fuzzy rules, which are used to describe the input and output variables of a fuzzy robot control system. In order to improve the reliability of the solutions proposed in the structure of the fuzzy inference, hard and soft arithmetic operations are used. Evaluation of the system is based on calculation of a standard deviation (RMSE — root mean square error). The best solution for the fuzzy system is the option, in which the RMSE is minimal. The second method envisages a change in the structure of the control code of a mobile robot. The results of the experimental studies presented in the article show that without the use of the methods of the structural and parametric adaptation the accuracy of the soft fuzzy model is 2,7 times higher than the accuracy of a rigid fuzzy model, which has a dead zone, reducing its stability. However, a combination of the above methods makes the accuracy of the rigid model higher than that of the soft model. At that, a deadband is ruled out and computational complexity is reduced. In order to explain the proposed methods of adaptation the article presents the results of the experimental studies evaluating the movement of a mobile robot along a line on an oval track.

Keywords: fuzzy inference system, mobile robot, control system, RMSE, soft computing, soft arithmetic operations

Acknowledgements: This work was supported with MD-2983.2015 grant of the President of the Russian Federation.

For citation:

Bobyr M. V. Adaptation of the Mobile Robot Control System Based on Fuzzy Logic, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 7, pp. 449—455.

DOI: 10.17587/mau.16.449-455

References

1. Shcherbatov I. A., Protalinskii I. O., Borodin V. A. Sistema interpretirovaniya golosovykh komand dlya upravleniya mobil'nyim robotom (The System of Interpreting of Voice Commands for Control a Mobile Robot), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 6, pp. 14—18 (in Russian).

2. Majid Moradi Zirkohi, Mohammad Mehdi Fateh, Mahdi Aliyari Shoorehdeli. Type-2 Fuzzy Control for a Flexible — joint Robot Using

Voltage Control Strategy, *International Journal of Automation and Computing*, 2013, vol. 10, iss. 3, pp. 242—255.

3. Nusratov O. K., Dzhafarov P. S., Zeinalov E. P., Mustafayeva A. M., Dzhaforov S. M. *Analiiticheskiy metod sinteza regulyatora s nechetkoi TS-model'yu dlya upravleniya manipulyatorom robota s gibkim soedineniem* (Analytical Method for Design of a Controller with Fuzzy Model for Control of a Flexible Joint Robot Arm as a Nonlinear Dynamical Object), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2011, no. 8, pp. 10—14 (in Russian).

4. Pegat A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie* (Fuzzy Modeling and Control), Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy, 2012, 798 p. (in Russian).

5. Bobyr' M. V., Titov V. S., Akul'shin G. Yu. *Modelirovanie nechetko-logicheskikh sistem upravleniya na osnove myagkikh arifmeticheskikh operatsii* (Modeling of Fuzzy-logic Control Systems on the Basis of Soft Arithmetic Operations), *Vestnik Komp'yuternykh i Informatsionnykh Tekhnologii*, 2013, no. 3, pp. 29—35 (in Russian).

6. **Bobyř M. V., Titov V. S., Akul'shin G. Yu.** *Vliyanie chisla pravil na obuchenie nechetko-logicheskoi sistemy* (Effect of number rule on training of fuzzy-logic systems), *Vestnik Komp'yuternykh i Informatsionnykh Tekhnologii*, 2014, № 11 (125), pp. 28–35 (in Russian).
7. **Titov V. S., Bobyř M. V., Antsiferov A. V.** *Adaptivnyi mul'ti-setevoi algoritm nechetko-logicheskogo vyvoda v zadachakh upravleniya oborudovaniem s ChPU* (Adaptive Multineuro Algorithm Fuzzy-Logic Inference in the Tasks Control of the Equipment with CNC), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 5, pp. 18–23 (in Russian).
8. **Emel'yanov S. G., Titov V. S., Bobyř M. V.** *Adaptivnye nechetko-logicheskie sistemy upravleniya* (Adaptive Fuzzy Logic Control System), Moscow, ARGAMAK-MEDIA, 2013, 184 p. (in Russian).
9. **Titov V. S., Bobyř M. V., Antsiferov A. V.** *Algoritm vysokoskorostnoi obrabotki detalei na osnove nechetkoi logiki* (Automated System of the High-Speed Detail Processing), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2012, no. 6, pp. 21–26 (in Russian).
10. **Emel'yanov S. G., Bobyř M. V., Antsiferov A. V.** *Algoritm samoobucheniya adaptivnykh neuro-nechetkikh sistem na osnove myagkikh vychislenii* (Self-developed algorithm adaptive neuro-fuzzy systems based on soft computing), *Informatsionno-Izmeritel'nye i Upravlyayushchie Sistemy*, 2013, vol. 11, no. 8, pp. 003–009 (in Russian).
11. **Titov V. S., Bobyř M. V., Belomestnaya A. L.** *Intel'kturnaya sistema upravleniya podachei pri obrabotke detalei rezaniem* (Intellectual Control System of Feed at Cutting), *Promyshlennye ASU i Kontrollery*, 2010, no. 8, pp. 17–20 (in Russian).
12. **Emel'yanov S. G., Titov V. S., Bobyř M. V.** *Intel'kturnaya sistema na osnove nechetkoi logiki i myagkikh arifmeticheskikh operatsii* (Intelligent systems based on fuzzy logic and soft arithmetic operations), Moscow, ARGAMAK-MEDIA, 2014, 341 p. (in Russian).
13. **Bobyř M. V., Titov V. S., Belomestnaya A. L.** *Stabilizatsiya teplovogo rezhima v protsesse rezaniya* (Stabilisation of Thermal Modes in the Course of Cutting), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2010, no. 6, pp. 38–41 (in Russian).
14. **Bobyř M. V., Titov V. S.** *Metod korrektsii parametrov rezhima rezaniya v sistemakh s ChPU* (Automated Control Systems Accuracy of Processing of Details with Usage of Methods of Fuzzy Logic), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2010, no. 7, pp. 49–53 (in Russian).
15. **Bobyř M. V., Titov V. S., Milostnaya N. A., Globin P. V.** *Otsenka dostovernosti pri modelirovani nechetko-logicheskikh sistem* (The reliability of when modeling a fuzzy-logic systems), *Promyshlennye ASU i Kontrollery*, 2012, no. 7, pp. 32–38 (in Russian).
16. **Bobyř M. V.** *Modernizatsiya ASU oborudovaniem s ChPU na osnove apparata nechetkoi logiki* (Modernisation Of The Automated Control Systems By The Equipment With NPC On The Basis Fuzzy Logic), *Problemy Mashinostroeniya i Avtomatizatsii*, 2010, no. 2, pp. 40–43 (in Russian).
17. **Titov V. S., Bobyř M. V., Milostnaya N. A., Bobovnikov N. Yu.** *Ustroistvo dlya obrabotki detalei na oborudovanii s ChPU. Patent RF na izobretenie № 2309034* (Apparatus For Working Parts In Number Program Controlled Equipment) (in Russian).
18. **Titov V. S., Bobyř M. V., Milostnaya N. A.** *Ustroistvo vysokotochnoi obrabotki detalei na oborudovanii ChPU. Patent RF na izobretenie № 2280540* (Part High-Accuracy Working Apparatus In NC Machine Tools) (in Russian).
19. **Titov V. S., Bobyř M. V., Yakhontova E. S.** *Sposob i ustroistvo upravleniya tochnost'yu obrabotki detalei. Patent RF na izobretenie № 2379169* (Method And Device For Accuracy Control Of Details Treatment) (in Russian).
20. **Titov V. S., Bobyř M. V., Milostnaya N. A.** *Ustroistvo upravleniya tochnost'yu obrabotki detalei. Patent RF na izobretenie № 2288809* (Part Working Accuracy Control Apparatus) (in Russian).
21. **Titov V. S., Bobyř M. V., Milostnaya N. A.** *Analiz sistem upravleniya mashinostroitel'nykh oborudovaniem* (Analysis of control systems engineering equipment), *Promyshlennye ASU i Kontrollery*, 2009, no. 2, pp. 3–4 (in Russian).
22. **Bobyř M. V., Emel'yanov S. G., Milostnaya N. A.** *O nekotorykh svoystvakh modelirovaniya adaptivnykh neuro-nechetkikh sistem na osnove uproschennogo nechetko-logicheskogo vyvoda* (Some properties of the simulation of adaptive neuro-fuzzy systems based on a simplified fuzzy inference), *Informatsionno-Izmeritel'nye i Upravlyayushchie Sistemy*, 2014, vol. 12, no. 5, pp. 4–12 (in Russian).

УДК 531.38; 681.5

DOI: 10.17587/mau.16.456-463

Е. И. Нелаева, аспирант, LomovtsevaEI@yandex.ru,
Ю. Н. Челноков, д-р физ.-мат. наук, проф., chelnokovyun@info.sgu.ru,
 Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского,
 Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов

Решение прямых и обратных задач кинематики роботов-манипуляторов с использованием дуальных матриц и бикватернионов на примере стэнфордского манипулятора¹. Часть 2²

На примере стэнфордского манипулятора рассматривается методология решения обратной задачи кинематики с использованием бикватернионной теории кинематического управления. Разрабатывается алгоритм решения обратной задачи кинематики. Приводятся примеры численного решения обратной задачи кинематики для стэнфордского манипулятора, выявляющие зависимости численного решения от параметров задачи.

Ключевые слова: робот-манипулятор, бикватернион, кинематические уравнения, обратная задача кинематики

1. Постановка задачи

Рассматривается решение обратной задачи кинематики с использованием бикватернионной теории кинематического управления [1]. В качестве

модели движения стэнфордского манипулятора [2] используются кинематические уравнения движения манипулятора [3]

$$(\dot{\varphi}_1 \ \dot{\varphi}_2 \ \dot{d}_3 \ \dot{\varphi}_4 \ \dot{\varphi}_5 \ \dot{\varphi}_6)^T = A^{-1} \cdot (\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3 \ v_1 \ v_2 \ v_3)^T, (1)$$

где φ_i ($i = 1, 2, 4, 5, 6$), d_3 — обобщенные координаты манипулятора; матрица A является сложной функцией обобщенных координат; ω_i и v_i — проекции угловой и линейной скоростей выходного

¹ Часть 1 опубликована в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление", № 6, 2015.

² Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-01-00165).

звена манипулятора на оси связанной с ним системы координат. При этом входящие в уравнения проекции ω_i и v_j угловой и линейной скоростей выходного звена манипулятора рассматриваются как управления и формируются в виде функций обобщенных координат манипулятора φ_i, d_3 .

Используются два закона управления. При использовании закона управления в нормированных бикватернионах [1, 3] имеем:

$$\mathbf{U}_{x_6 y_6 z_6} = \boldsymbol{\omega}_{x_6 y_6 z_6} + s \mathbf{v}_{x_6 y_6 z_6} = -(2K_{oc}^*/M_0^*)\mathbf{M}_{sc}^*; \quad (2)$$

$$\mathbf{M}^* = M_0^* + \mathbf{M}_{sc}^* = \bar{\mathbf{N}} \circ \boldsymbol{\Lambda}(t), \quad (3)$$

где $\mathbf{U}_{x_6 y_6 z_6}$ — отображение кинематического винта \mathbf{U} выходного звена на оси связанной с выходным звеном системы координат; $\boldsymbol{\omega}_{x_6 y_6 z_6}$ и $\mathbf{v}_{x_6 y_6 z_6}$ — векторы угловой и линейной скоростей выходного звена манипулятора, определенные своими компонентами в связанной с ним системе координат; s — символ (комплексность) Клиффорда, обладающий свойством $s^2 = 0$; K_{oc}^* — дуальный коэффициент усиления обратной связи; M_0^* и \mathbf{M}_{sc}^* — скалярная и винтовая части собственного бикватерниона ошибки положения выходного звена манипулятора \mathbf{M}^* ; $\bar{\mathbf{N}} = \text{const}$ — бикватернион, характеризующий программное (требуемое) положение выходного звена; $\boldsymbol{\Lambda}$ — бикватернион текущего положения схвата манипулятора, верхняя черта означает символ сопряжения.

Для закона управления в ненормированных бикватернионах имеем [1, 3]:

$$\mathbf{U}_{x_6 y_6 z_6} = \boldsymbol{\omega}_{x_6 y_6 z_6} + s \mathbf{v}_{x_6 y_6 z_6} = K_{oc}^* T^{-1} \text{screw}(\bar{\mathbf{L}} \circ \mathbf{N});$$

$$\bar{\mathbf{L}} \circ \mathbf{N} = \bar{\mathbf{M}}^*; \quad (4)$$

$$2 \frac{dT}{dt} = K_{oc}^* [\text{scal}(\bar{\mathbf{L}} \circ \mathbf{N}) - T], \quad T(t_0) = 1, \quad (5)$$

где T — тензор (модуль) ненормированного бикватерниона положения выходного звена манипулятора, удовлетворяющий дифференциальному уравнению (5); screw — винтовая часть бикватерниона, scal — скалярная часть бикватерниона.

Бикватернион конечного положения выходного звена манипулятора определяется через обобщенные координаты, и, конструктивные параметры манипулятора по формулам [3]

$$\boldsymbol{\Lambda} = \boldsymbol{\Lambda}_1 \circ \boldsymbol{\Lambda}_2 \circ \boldsymbol{\Lambda}_3 \circ \boldsymbol{\Lambda}_4 \circ \boldsymbol{\Lambda}_5 \circ \boldsymbol{\Lambda}_6; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Lambda}_i = & \cos \frac{\alpha_i}{2} \cos \left(\frac{\theta_i + \varphi_i}{2} + s \frac{d_i}{2} \right) + \\ & + \sin \frac{\alpha_i}{2} \cos \left(\frac{\theta_i + \varphi_i}{2} + s \frac{d_i}{2} \right) \mathbf{i}_1 + \\ & + \sin \frac{\alpha_i}{2} \sin \left(\frac{\theta_i + \varphi_i}{2} + s \frac{d_i}{2} \right) \mathbf{i}_2 + \\ & + \cos \frac{\alpha_i}{2} \sin \left(\frac{\theta_i + \varphi_i}{2} + s \frac{d_i}{2} \right) \mathbf{i}_3, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\boldsymbol{\Lambda}_i$ — бикватернионы относительных конечных перемещений звеньев манипулятора; α_i, θ_i, d_i (кроме d_3) — конструктивные параметры звеньев манипулятора; φ_i, d_3 — обобщенные координаты манипулятора; $\mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2, \mathbf{i}_3$ — векторные мнимые единицы Гамильтона.

2. Алгоритм численного решения обратной задачи кинематики

В случае использования закона управления в нормированных бикватернионах (2), (3) собственный бикватернион ошибки местоположения \mathbf{M}^* можно представить в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{M}^* = \mathbf{m} + s \mathbf{m}_0 = & (m^0 + s m_0^0) + (m^1 + s m_0^1) \mathbf{i}_1 + \\ & + (m^2 + s m_0^2) \mathbf{i}_2 + (m^3 + s m_0^3) \mathbf{i}_3 = M_0^* + \mathbf{M}_{sc}^*, \end{aligned}$$

где m^j и m_0^j ($j = 0, 1, 2, 3$) — компоненты главной и моментной частей бикватерниона \mathbf{M}^* соответственно.

Тогда скалярная M_0^* и винтовая \mathbf{M}_{sc}^* части бикватерниона ошибки местоположения запишутся в виде

$$M_0^* = (m^0 + s m_0^0); \quad (8)$$

$$\mathbf{M}_{sc}^* = (m^1 + s m_0^1) \mathbf{i}_1 + (m^2 + s m_0^2) \mathbf{i}_2 + (m^3 + s m_0^3) \mathbf{i}_3. \quad (9)$$

Будем формировать управление движением выходного звена манипулятора по формулам (2), (3). С учетом соотношений (8), (9) закон управления можно представить следующим образом:

$$\mathbf{U}_{x_6 y_6 z_6} = - \left(\frac{2K_{oc}^*}{M_0^*} \right) \mathbf{M}_{sc}^* =$$

$$= -2 \left(\frac{k m^0}{(m^0)^2} + \frac{k_0 m^0 - k m_0^0}{(m^0)^2} \right) \times$$

$$\times ((m^1 + s m_0^1) \mathbf{i}_1 + (m^2 + s m_0^2) \mathbf{i}_2 + (m^3 + s m_0^3) \mathbf{i}_3), \quad (10)$$

где k и k_0 — главная и моментная части дуального коэффициента усиления обратной связи K_{oc}^* .

Выделяя в (10) главную $\boldsymbol{\omega}_{x_6 y_6 z_6} = \omega_1 \mathbf{i}_1 + \omega_2 \mathbf{i}_2 + \omega_3 \mathbf{i}_3$

и моментную $\mathbf{v}_{x_6 y_6 z_6} = v_1 \mathbf{i}_1 + v_2 \mathbf{i}_2 + v_3 \mathbf{i}_3$ части, получим законы формирования требуемых проекций ω_j и v_j угловой и линейной скоростей движения выходного звена манипулятора (управлений) в следующем виде:

$$\omega_j = -2 \frac{k m^j}{m^0}; \quad v_j = \frac{-2 k m^0 m_0^j - 2 k_0 m^0 m^j + 2 k m_0^0 m^j}{(m^0)^2},$$

$$j = 1, 2, 3. \quad (11)$$

Рассмотрим закон управления в ненормированных бикватернионах. Решая дифференциальное уравнение (5) относительно тензора T , получим:

$$T = \text{scal}(\bar{\mathbf{L}} \circ \mathbf{N}) + (1 - \text{scal}(\bar{\mathbf{L}}(t_0) \circ \mathbf{N})) \mathbf{e}^{-\frac{K_{oc}^* t}{2}}. \quad (12)$$

Тогда закон управления (4), (5) переписывается в виде

$$\mathbf{U}_{x_6 y_6 z_6} = K_{oc}^* T^{-1} \text{screw}(\bar{\mathbf{L}} \circ \mathbf{N});$$

$$T = \text{scal}(\bar{\mathbf{L}} \circ \mathbf{N}) + (1 - \text{scal}(\bar{\mathbf{L}}(t_0) \circ \mathbf{N})) \mathbf{e}^{-\frac{K_{oc}^* t}{2}}. \quad (13)$$

Обозначим $\mathbf{R} = \bar{\mathbf{M}}^* = \bar{\mathbf{L}} \circ \mathbf{N}$; $\mathbf{P} = \bar{\mathbf{M}}^*(t_0) = \bar{\mathbf{L}}(t_0) \circ \mathbf{N}$, где

$$\begin{aligned} \mathbf{R} = \mathbf{r} + s\mathbf{r}_0 &= (r^0 + r^1 \mathbf{i}_1 + r^2 \mathbf{i}_2 + r^3 \mathbf{i}_3) + s(r_0^0 + r_0^1 \mathbf{i}_1 + \\ &+ r_0^2 \mathbf{i}_2 + r_0^3 \mathbf{i}_3) = (r^0 + sr_0^0) + (r^1 + sr_0^1) \mathbf{i}_1 + \\ &+ (r^2 + sr_0^2) \mathbf{i}_2 + (r^3 + sr_0^3) \mathbf{i}_3 = \mathbf{R}_0 + \mathbf{R}_{SC}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P} = \mathbf{p} + s\mathbf{p}_0 &= (\rho^0 + \rho^1 \mathbf{i}_1 + \rho^2 \mathbf{i}_2 + \rho^3 \mathbf{i}_3) + s(\rho_0^0 + \rho_0^1 \mathbf{i}_1 + \\ &+ \rho_0^2 \mathbf{i}_2 + \rho_0^3 \mathbf{i}_3) = (\rho^0 + s\rho_0^0) + (\rho^1 + s\rho_0^1) \mathbf{i}_1 + \\ &+ (\rho^2 + s\rho_0^2) \mathbf{i}_2 + (\rho^3 + s\rho_0^3) \mathbf{i}_3 = \mathbf{P}_0 + \mathbf{P}_{SC}. \end{aligned}$$

Здесь \mathbf{r} и \mathbf{r}_0 — главная и моментная части бикватерниона \mathbf{R} ; r^j и r_0^j — компоненты кватернионов \mathbf{r} и \mathbf{r}_0 соответственно; \mathbf{p} и \mathbf{p}_0 — главная и моментная части бикватерниона \mathbf{P} ; ρ^j и ρ_0^j — компоненты кватернионов \mathbf{p} и \mathbf{p}_0 соответственно.

Тогда

$$\text{scal}(\bar{\mathbf{L}} \circ \mathbf{N}) = \mathbf{R}_0 = r^0 + sr_0^0;$$

$$\begin{aligned} \text{screw}(\bar{\mathbf{L}} \circ \mathbf{N}) = \mathbf{R}_{SC} &= (r^1 + sr_0^1) \mathbf{i}_1 + \\ &+ (r^2 + sr_0^2) \mathbf{i}_2 + (r^3 + sr_0^3) \mathbf{i}_3; \end{aligned}$$

$$\text{scal}(\bar{\mathbf{L}}(t_0) \circ \mathbf{N}) = \mathbf{P}_0 = \rho^0 + s\rho_0^0.$$

Обозначим $T = \tau + s\tau_0$, где τ и τ_0 — соответственно главная и моментная части тензора T . В соответствии с выражением (12) и введенными обозначениями тензор можно представить следующим образом (учитываем, что $s^2 = 0$):

$$\begin{aligned} T &= \mathbf{R}_0 + (1 - \mathbf{P}_0) \mathbf{e}^{-\frac{k + sk_0 t}{2}} = \\ &= \mathbf{R}_0 + (1 - \mathbf{P}_0) \mathbf{e}^{-\frac{k}{2} t} \left(1 - s \frac{k_0}{2} t + \frac{\left(-s \frac{k_0}{2} t\right)^2}{2} + \dots \right) = \\ &= \mathbf{R}_0 + (1 - \mathbf{P}_0) \mathbf{e}^{-\frac{k}{2} t} \left(1 - s \frac{k_0}{2} t \right) = \\ &= r^0 + sr_0^0 + ((1 - \rho^0) - s\rho_0^0) \mathbf{e}^{-\frac{k}{2} t} \left(1 - s \frac{k_0}{2} t \right) = \end{aligned}$$

$$= \left(r^0 + (1 - \rho^0) \mathbf{e}^{-\frac{k}{2} t} \right) +$$

$$+ s \left(r_0^0 - \left((1 - \rho_0^0) \frac{k_0}{2} t + \rho_0^0 \right) \mathbf{e}^{-\frac{k}{2} t} \right) = \tau + s\tau_0.$$

Таким образом,

$$\begin{aligned} \tau &= r^0 + (1 - \rho^0) \mathbf{e}^{-\frac{k}{2} t}, \\ \tau_0 &= r_0^0 - \left((1 - \rho_0^0) \frac{k_0}{2} t + \rho_0^0 \right) \mathbf{e}^{-\frac{k}{2} t}. \end{aligned} \quad (14)$$

Закон управления (13) теперь можно переписать в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{x_6 y_6 z_6} &= \frac{k + sk_0}{\tau + s\tau_0} ((r^1 + sr_0^1) \mathbf{i}_1 + (r^2 + sr_0^2) \mathbf{i}_2 + \\ &+ (r^3 + sr_0^3) \mathbf{i}_3) = \left(\frac{k}{\tau} - s \frac{k\tau_0 + k_0\tau}{\tau^2} \right) ((r^1 + sr_0^1) \mathbf{i}_1 + \\ &+ (r^2 + sr_0^2) \mathbf{i}_2 + (r^3 + sr_0^3) \mathbf{i}_3) = \\ &= \left(\frac{k}{\tau} r^1 + s \left(\frac{k}{\tau} r_0^1 - \frac{k\tau_0 - k_0\tau}{\tau^2} r^1 \right) \right) \mathbf{i}_1 + \\ &+ \left(\frac{k}{\tau} r^2 + s \left(\frac{k}{\tau} r_0^2 - \frac{k\tau_0 - k_0\tau}{\tau^2} r^2 \right) \right) \mathbf{i}_2 + \\ &+ \left(\frac{k}{\tau} r^3 + s \left(\frac{k}{\tau} r_0^3 - \frac{k\tau_0 - k_0\tau}{\tau^2} r^3 \right) \right) \mathbf{i}_3. \end{aligned} \quad (15)$$

Выделяя в выражении (15) главную $\boldsymbol{\omega}_{x_6 y_6 z_6} = \omega_1 \mathbf{i}_1 + \omega_2 \mathbf{i}_2 + \omega_3 \mathbf{i}_3$ и моментную $\mathbf{v}_{x_6 y_6 z_6} = v_1 \mathbf{i}_1 + v_2 \mathbf{i}_2 + v_3 \mathbf{i}_3$ части, получим вещественные законы формирования управлений:

$$\omega_j = \frac{k}{\tau} r^j, \quad v_j = \frac{k}{\tau} r_0^j - \frac{k\tau_0 - k_0\tau}{\tau^2} r^j, \quad j = 1, 2, 3. \quad (16)$$

В нашей постановке решение обратной задачи кинематики стэнфордского манипулятора сводится к решению задачи управления движением выходного звена манипулятора. При этом за программное положение выходного звена манипулятора будем принимать то положение, для которого необходимо решить обратную задачу кинематики. Начальное положение выходного звена будем задавать произвольным набором значений обобщенных координат из их рабочих диапазонов. Таким образом, в результате решения задачи управления получим набор обобщенных координат манипулятора, отвечающих заданному программному положению, т. е. одно из решений обратной задачи кинематики.

При численном решении обратной задачи кинематики программный бикватернион \mathbf{N} будем определять по формулам, аналогичным (6), (7), задавая

фазовым координатам робота-манипулятора некоторые значения из их рабочих диапазонов:

$$\mathbf{N} = \mathbf{N}_1 \circ \mathbf{N}_2 \circ \mathbf{N}_3 \circ \mathbf{N}_4 \circ \mathbf{N}_5 \circ \mathbf{N}_6,$$

$$\begin{aligned} \mathbf{N}_i = & \cos \frac{\alpha_j}{2} \cos \left(\frac{\theta_i + \varphi_i}{2} + s \frac{d_j}{2} \right) + \\ & + \sin \frac{\alpha_j}{2} \cos \left(\frac{\theta_i + \varphi_i}{2} + s \frac{d_j}{2} \right) \mathbf{i}_1 + \\ & + \sin \frac{\alpha_j}{2} \sin \left(\frac{\theta_i + \varphi_i}{2} + s \frac{d_j}{2} \right) \mathbf{i}_2 + \\ & + \cos \frac{\alpha_j}{2} \sin \left(\frac{\theta_i + \varphi_i}{2} + s \frac{d_j}{2} \right) \mathbf{i}_3. \end{aligned}$$

Алгоритм решения обратной задачи кинематики при использовании закона управления в нормированных бикватернионах заключается в численном интегрировании системы дифференциальных уравнений (1), дополненных соотношениями (11) и формулами (6), (7). В случае же использования закона управления в ненормированных бикватернионах решение обратной задачи кинематики сводится к численному интегрированию системы дифференциальных уравнений (1), дополненных соотношениями (14), (16) и (6), (7). Используемые законы управления ω_j, v_j , построенные по принципу обратной связи, гарантируют асимптотически устойчивый выход схвата робота-манипулятора в требуемое конечное положение, заданное бикватернионом \mathbf{N} , с требуемой степенью точности. Значения обобщенных координат q_i , соответствующие этому конечному положению схвата манипулятора, и будут одним из решений обратной задачи кинематики робота-манипулятора.

Отметим, что приведенные законы управления, используемые в алгоритме решения обратной задачи кинематики, справедливы для любого манипулятора (конкретная схема манипулятора учитывается при построении кинематических уравнений манипулятора и при нахождении бикватерниона конечного положения выходного звена манипулятора, присутствующего в законе управления).

3. Анализ численного решения

1. Проведено численное решение обратной задачи кинематики стэнфордского манипулятора с различными значениями входных параметров с использованием двух законов управления, формируемых по алгоритмам, описанным в п. 2. Программное положение выходного звена манипулятора задавалось набором фазовых координат манипулятора, аналогично задавалось и начальное положение.

В случае, когда начальное положение было задано набором обобщенных координат, представленным в табл. 1, а требуемое конечное (программное) положение — набором, приведенным в табл. 2, при шаге интегрирования $h = 0,01$ с, коэффициенте

Таблица 1

φ_1	φ_2	d_3	φ_4	φ_5	φ_6
-30°	15°	0,1 м	36°	-90°	45°

Таблица 2

φ_1	φ_2	d_3	φ_4	φ_5	φ_6
20°	40°	0,3 м	-35°	60°	-45°

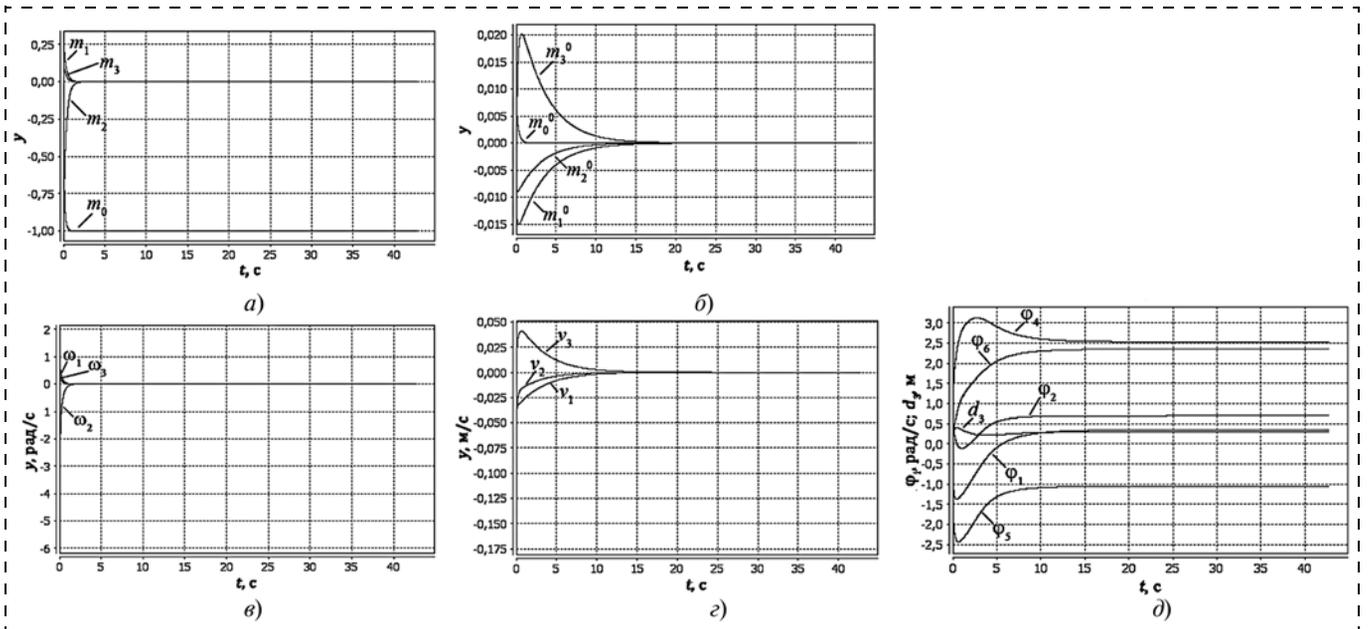


Рис. 1. Закон управления в нормированных бикватернионах:

a — графики изменения компонент главной части бикватерниона ошибки местоположения; b — графики изменения компонент моментной части бикватерниона ошибки местоположения; v — графики изменения компонент главной части управления; z — графики изменения компонент моментной части управления; d — графики изменения фазовых координат

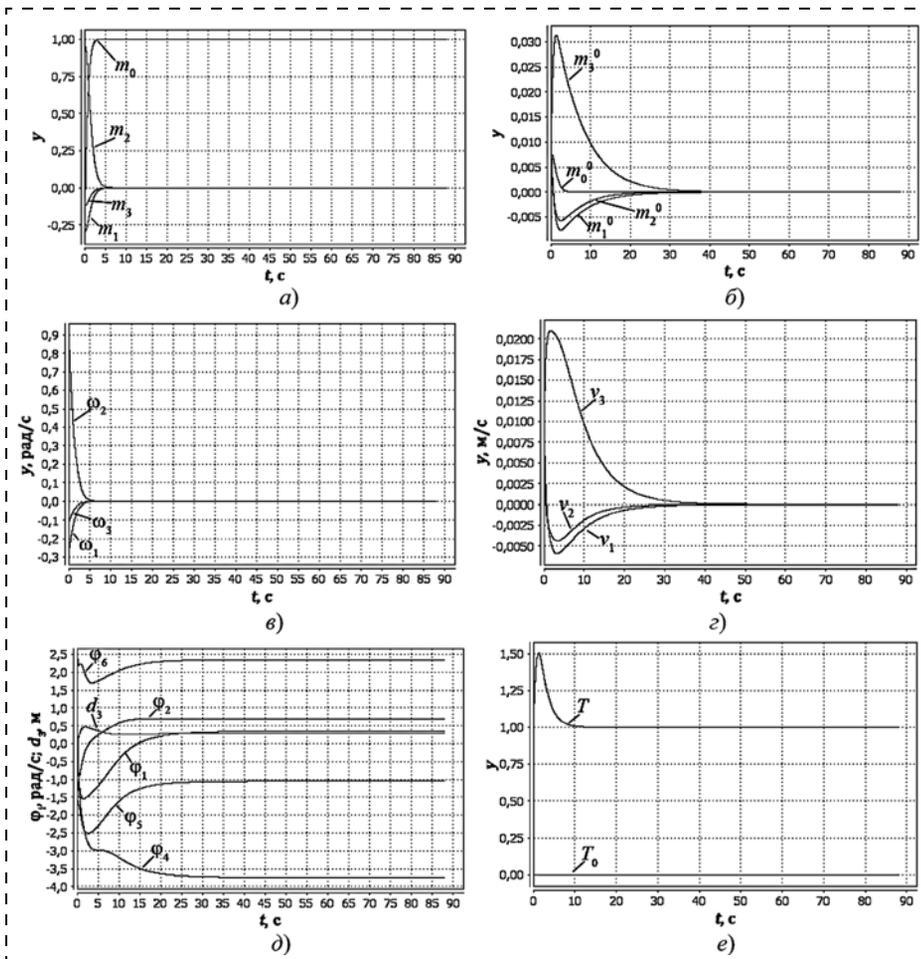


Рис. 2. Закон управления в ненормированных бикватернионах:
 а — графики изменения компонент главной части бикватерниона ошибки местоположения; б — графики изменения компонент моментной части бикватерниона ошибки местоположения; в — графики изменения компонент главной части управления; г — графики изменения компонент моментной части управления; д — графики изменения фазовых координат; е — графики изменения компонент тензора

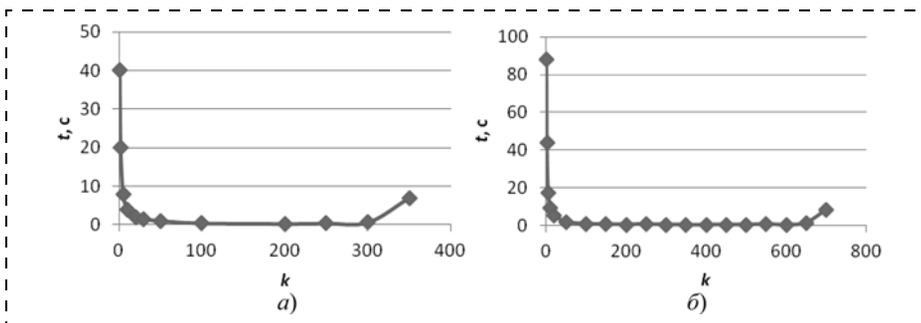


Рис. 3. Графики зависимости времени интегрирования (численного решения задачи) от главной части коэффициента усиления обратной связи ($h = 0,01$ с):
 а — закон управления в нормированных бикватернионах; б — закон управления в ненормированных бикватернионах

усиления обратной связи $K_{oc}^* = 1$ и требуемой точности решения, равной 10^{-6} , были получены результаты, приведенные на рис. 1, 2. На этих рисунках приведены графики изменения обобщенных координат, главной и моментной частей бикватернионов ошибки местоположения, главной и

2. Проведено численное решение обратной задачи кинематики для двух законов управления. При этом изменялась главная часть коэффициента усиления обратной связи. Начальное и программное положения выходного звена задавали теми же наборами обобщенных координат, что и в случае 1. Графики зависимости времени интегрирования

моментной частью управления и тензора для законов управления в нормированных и ненормированных бикватернионах. Время интегрирования (численного решения задачи с заданной точностью 10^{-6}) с использованием закона управления в нормированных бикватернионах, необходимое для достижения заданной точности решения задачи, составило 42,68 с, а в ненормированных бикватернионах — 87,94 с.

В результате численного решения были получены значения обобщенных координат, совпадающие для обоих законов управления (табл. 3).

Таблица 3

φ_1	φ_2	d_3	φ_4	φ_5	φ_6
20°	40°	0,3 м	145°	-60°	135°

Отметим, что в силу неоднозначности решения обратной задачи кинематики полученные значения фазовых координат могут отличаться от тех задаваемых значений, по которым вычислялся бикватернион программного положения выходного звена. В данном случае значения координат φ_4 и φ_6 отличаются на π , а значения координаты φ_5 отличаются на $2\pi/3$, значения координат $\varphi_1, \varphi_2, d_3$ совпадают.

Компоненты бикватерниона ошибки местоположения выходного звена в ходе численного решения приняли следующие значения: $m_i = 0, i = 1, 2, 3, m_j^0 = 0, j = 0, 1, 2, 3; m_0 = -1$ для закона управления в нормированных бикватернионах; $m_0 = 1$ для закона управления в ненормированных бикватернионах.

Таким образом, получили, как и следовало ожидать, что бикватернион $M^*(t) \rightarrow \pm 1$ при $t \rightarrow \infty$.

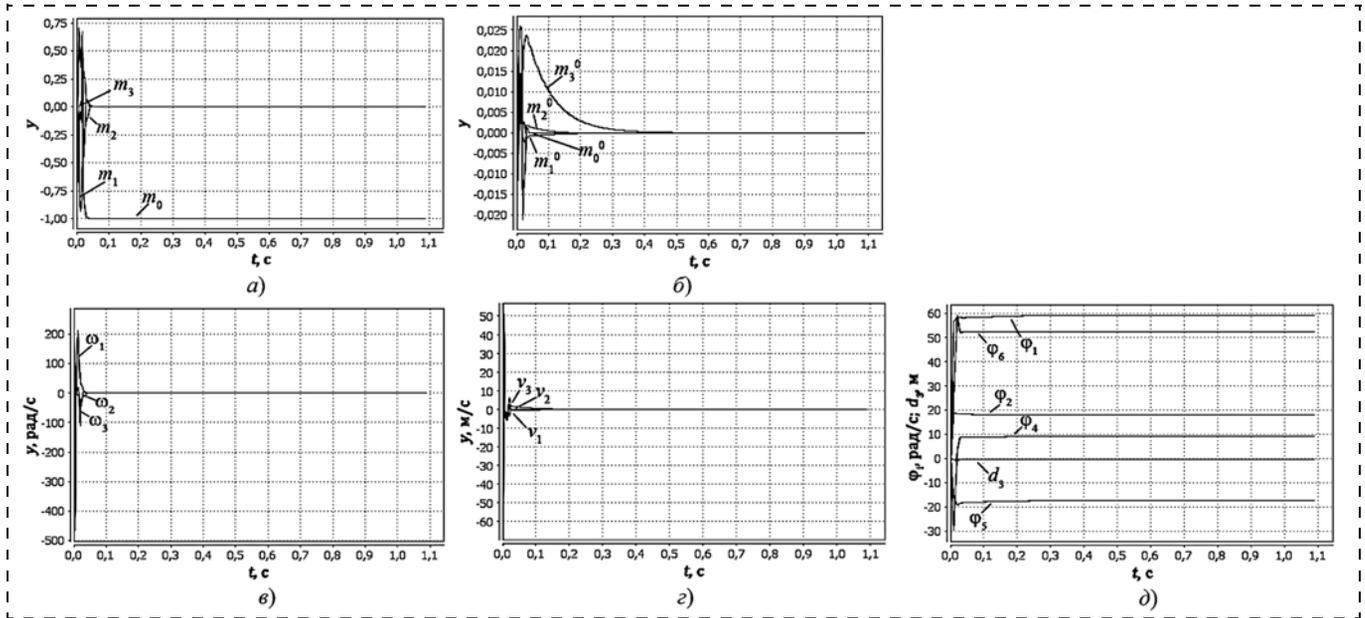


Рис. 4. Закон управления в нормированных бикватернионах ($k = 40$): *a* — графики изменения компонент главной части бикватерниона ошибки местоположения; *б* — графики изменения компонент моментной части бикватерниона ошибки местоположения; *в* — графики изменения компонент главной части управления; *г* — графики изменения компонент моментной части управления; *д* — график изменения фазовых координат

(численного решения задачи с заданной точностью 10^{-6}) от коэффициента усиления обратной связи изображены на рис. 3.

Из графиков видно, что сначала, при увеличении главной части коэффициента усиления обратной связи, время решения обратной задачи кинематики заметно снижается. Однако дальнейшее увеличение уже не приводит к уменьшению времени решения, кроме того, начиная с некоторого значения коэффициента усиления обратной связи, изменяется характер переходного процесса, появляются срывы от устойчивости к неустойчивости (рис. 4, 5). Этот факт можно объяснить тем, что, начиная с некоторого значения коэффициента усиления обратной связи, время переходного процесса становится сопоставимым с шагом интегрирования. Отсюда можно сделать вывод, что при решении обратной задачи кинематики главную часть коэффициента усиления обратной связи не следует брать слишком большой во избежание появления сложных переходных процессов.

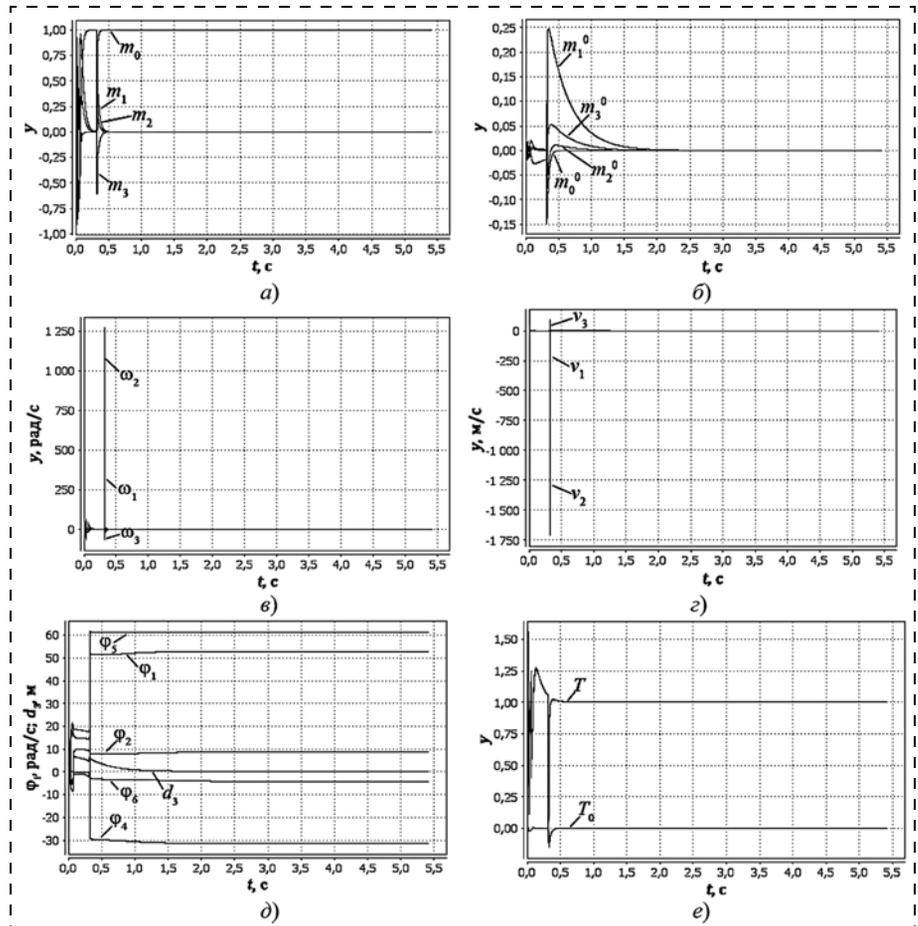


Рис. 5. Закон управления в ненормированных бикватернионах ($k = 20$): *a* — графики изменения компонент главной части бикватерниона ошибки местоположения; *б* — графики изменения компонент моментной части бикватерниона ошибки местоположения; *в* — графики изменения компонент главной части управления; *г* — графики изменения компонент моментной части управления; *д* — графики изменения фазовых координат; *е* — графики изменения компонент тензора

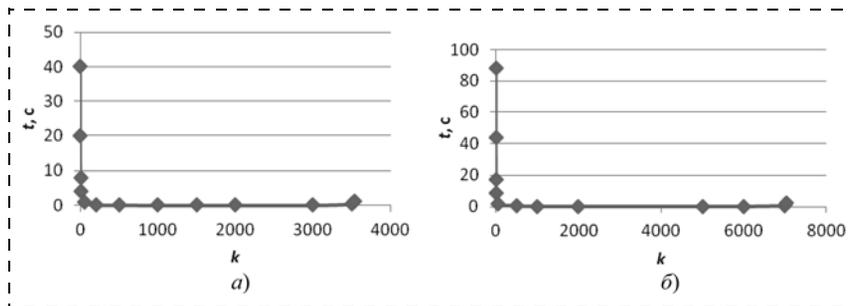


Рис. 6. Графики зависимости времени интегрирования (численного решения задачи) от главной части коэффициента усиления обратной связи ($h = 0,001$ с):
 а — закон управления в нормированных бикватернионах; б — закон управления в ненормированных бикватернионах

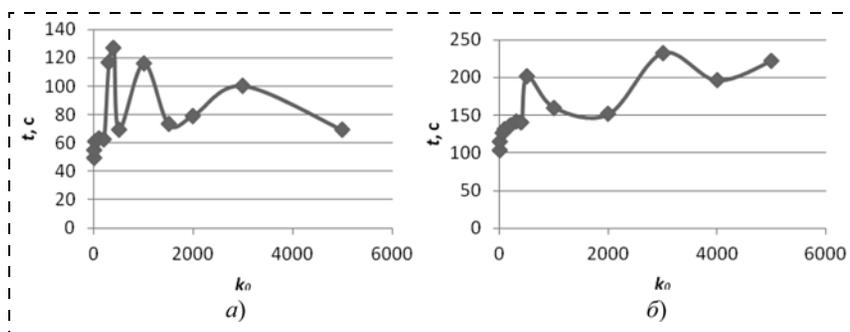


Рис. 7. Графики зависимости времени интегрирования (численного решения задачи) от моментной части коэффициента усиления обратной связи:
 а — закон управления в нормированных бикватернионах; б — закон управления в ненормированных бикватернионах

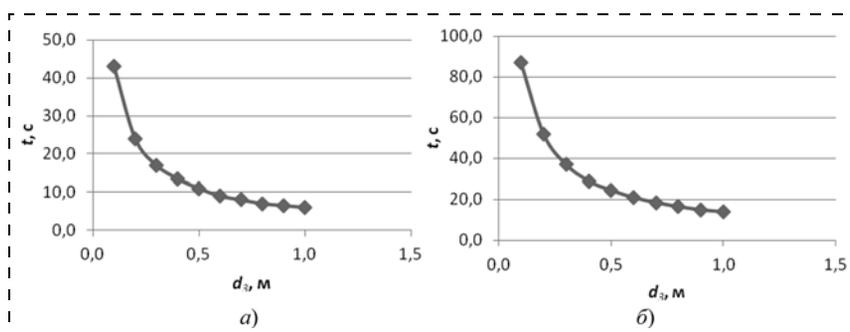


Рис. 8. Графики зависимости времени интегрирования (численного решения задачи) от начальной линейной координаты d_3 :
 а — закон управления в нормированных бикватернионах; б — закон управления в ненормированных бикватернионах

При уменьшении шага интегрирования в 10 раз (т. е. при использовании шага, равного 0,001 с, вместо 0,01 с) графики зависимости времени интегрирования от коэффициента усиления обратной

Таблица 4

φ_1	φ_2	d_3	φ_4	φ_5	φ_6
-30°	15°	0,1...1 м	36°	-90°	45°

Таблица 5

φ_1	φ_2	d_3	φ_4	φ_5	φ_6
20°	40°	0,3 м	-35°	60°	-45°

связи k также изменяются (рис. 6), причем критические значения k (при которых качественно меняется характер переходного процесса и при которых вовсе прекращается сходимость) увеличиваются ровно в 10 раз.

3. При фиксированной главной части коэффициента усиления обратной связи $k = 1$ проводилось изменение моментной части k_0 . Графики зависимости времени решения обратной задачи кинематики от моментной части коэффициента усиления обратной связи приведены на рис. 7.

В целом, можно сделать вывод, что изменение моментной части коэффициента усиления обратной связи не уменьшает времени решения задачи. Следовательно, при решении обратной задачи кинематики лучше использовать вещественный коэффициент усиления обратной связи.

4. При фиксированном заданном конечном положении выходного звена манипулятора для одних и тех же значений угловых координат начального положения проводилось изменение начальной линейной координаты d_3 .

Для случая, когда начальное положение было задано набором обобщенных координат, представленным в табл. 4, а требуемое конечное (программное) положение — набором, приведенным в табл. 5, при шаге интегрирования $h = 0,01$ с, коэффициенте усиления обратной связи $K_{oc}^* = 1$ и требуемой точности решения, равной 10^{-6} , были построены графики зависимости времени решения задачи от значений начальной линейной координаты d_3 (рис. 8).

Отметим, что чем больше значение начальной линейной координаты d_3 , тем меньше время, за которое компоненты моментной части бикватерниона ошибки местоположения сходятся к требуемым значениям. По этой причине уменьшается и общее время решения задачи. Из полученных результатов можно сделать вывод, что при решении обратной задачи кинематики следует брать значение начальной линейной координаты максимально возможным из рабочего диапазона манипулятора.

Отметим также, что в результате численного решения обратной задачи кинематики для разных значений входных параметров получался определенный набор фазовых координат, для которых программный (требуемый) бикватернион конечного положения выходного звена манипулятора имеет одно и то же значение (это отражает известный факт

неоднозначности решения обратной задачи кинематики). При этом полученные значения фазовых координат либо совпадали с теми, по которым вычислялся программный бикватернион, либо отличались от них на π , либо отличались знаком, либо они принимали совершенно другие значения. Из проведенных опытов можно сделать вывод, что принципиально другие значения фазовых координат получаются, когда имеют место сложные переходные процессы.

Проводя сравнение двух законов управления, можно отметить следующее: время решения обратной задачи кинематики меньше для закона управления в нормированных бикватернионах, чем для закона управления в ненормированных бикватернионах. В то же время максимальные амплитуды управлений (угловых и линейных скоростей) для

закона управления в ненормированных бикватернионах меньше. К тому же нужно иметь в виду возможность попадания в особую точку $M_0^* = 0$ при решении задачи в нормированных бикватернионах, которой нет для алгоритма в ненормированных бикватернионах.

Список литературы

1. **Челноков Ю. Н.** Бикватернионное решение кинематической задачи управления движением твердого тела и его приложение к решению обратных задач кинематики роботов-манипуляторов // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2013. № 1. С. 38—58.
2. **Фу К., Гонсалес Р., Ли К.** Робототехника. М.: Мир, 1989. 621 с.
3. **Нелаева Е. И., Челноков Ю. Н.** Решение прямых и обратных задач кинематики роботов-манипуляторов с использованием дуальных матриц и бикватернионов на примере стэнфордского манипулятора. Часть 1. 2015. Т. 16, № 6. С. 376—380.

Solution to the Problems of Direct and Inverse Kinematics of the Robots-Manipulators Using Dual Matrices and Biquaternions on the Example of Stanford Robot Arm. Part 2

E. I. Nelayeva, LomovtsevaEI@yandex.ru✉, **Yu. N. Chelnokov**, chelnokovyun@info.sgu.ru,
Saratov State University, Institute of Precision Mechanics and Control,
RAS, Saratov, 410028, Russian Federation

Corresponding author: **Nelayeva Ekaterina I.**, Postgraduate Student,
Chair of Mathematical and Computer Modeling, Saratov State University, Saratov, 410012, Russian Federation,
e-mail: LomovtsevaEI@yandex.ru

Received on January 27, 2015

Accepted February 18, 2015

This paper presents a new method of solving the inverse kinematics problem of manipulators with the help of the biquaternion theory of kinematics control. Application of the method reduces solving of Cauchy problem for differential kinematic equations of a manipulator motion. Vectors of the angular and linear velocities contained in these equations are considered as controls. They are formed according to the feedback principal as certain functions of generalized coordinates. As the result of solving of Cauchy problem for any given initial values of the generalized coordinates from their operational range the generalized coordinates will finally take the values corresponding to the desired position of the end effector, so the inverse kinematics problem will be solved. In this paper an algorithm for solving the inverse kinematics of Stanford robot arm is introduced. Control laws used in the algorithm are valid for any manipulator. A numerical solution of the inverse kinematics problem of Stanford robot arm has been found. It proves efficiency of application of the biquaternion theory of kinematics control for solving of the inverse kinematics problem of manipulators. Given examples of the numerical solution demonstrate dependency between the solution results (obtained values of the phase coordinates, solution time) and the input parameters, such as initial pose (position and orientation) of the end effector of a manipulator, accuracy of the solution and dual feedback gain. Graphs of the changes of the generalized coordinates, the main and moment parts of the biquaternion of the end effector error pose, the main and moment parts of the control and tensor were built.

Keywords: robot-manipulator, Stanford robot arm, biquaternion, kinematics equations, inverse kinematics problem

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 12-01-00165.

For citation:

Nelayeva E. I., Chelnokov Yu. N. Solutions to the Problems of Direct and Inverse Kinematics of the Robots-Manipulators Using Dual Matrices and Biquaternions on the Example of Stanford Robot Arm. Part 2, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 7, pp. 456—463.

DOI: 10.17587/mau.16.456-463

References

1. **Chelnokov Ju. N.** Bikvaternionnoe reshenie kinematicheskoy zadachi upravleniya dvizheniem tverdogo tela i ego prilozhenie k resheniju

obratnyh zadach kinematiki robotov-manipulyatorov (Biquaternion Solution of the Kinematic Control Problem for the Motion of a Rigid Body and Its Application to the Solution of Inverse Problems of Robot-Manipulator Kinematics), *Izv. RAN. Mehanika Tverdogo Tela*, 2013, no. 1, pp. 38—58 (in Russian).

2. **Fu K., Gonsales P., Li K.** *Robototekhnika* (Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence), Moscow, Mir, 1989, 621 p. (in Russian).

3. **Nelayeva E. I., Chelnokov Yu. N.** Resheniepryamih i obratnyh zadach kinematiki robotov-manipulyatorov s ispol'zovaniem dual'nyh matric i bikvaternionov na primere stjenfordskogo manipulyatora. Chast' 1 (Solution to the Problems of Direct and Inverse Kinematics of the Robots-Manipulators Using Dual Matrices and Biquaternions on the Example of Stanford Robot Arm. Part 1), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 6, pp. 376—380. (in Russian).

Нгуен Туан Зунг, аспирант, dughvkt@yahoo.com,
И. А. Щербатов, канд. техн. наук, доц., Sherbatov2004@mail.ru,
Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань

Совместное распознавание подвижных и неподвижных объектов в системе технического зрения робота

Предложены модифицированные алгоритмы совместного обнаружения подвижных и неподвижных объектов, которые разделяются на два типа: известные объекты (неподвижные препятствия, например, стол, стул, компьютер и пр.) и подвижные объекты (например, люди). Представлены модифицированные алгоритмы распознавания для каждого типа объектов: для неподвижных объектов применяется модифицированный алгоритм поиска ближайших соседей совместно с деревьями поиска (KNN) и библиотекой FLANN; для подвижных объектов типа "человек" применены встроенные алгоритмы комплекта разработчика (SDK) Microsoft Kinect. Показана эффективность алгоритма поиска ближайших соседей при обнаружении неподвижных объектов. Эффективность нахождения объектов увеличена за счет применения алгоритма SURF. Результаты экспериментов показывают эффективность предложенного подхода при использовании в составе системы технического зрения мобильной робототехнической платформы.

Ключевые слова: FLANN, SURF, мобильный робот, распознавание изображений, поиск ближайшего соседа, изображения глубины, предварительная обработка глубинных данных, Kinect SDK

Введение

Для автономной навигации мобильных роботизированных платформ в зданиях и сооружениях необходимо решить задачу объезда подвижных (человек) и неподвижных (предметы, мебель, оборудование и пр.) препятствий. Для этого система технического зрения робота должна обнаруживать и распознавать максимально возможное число препятствий, обеспечивая перемещение без столкновений.

Обнаружение не единственного объекта на фотографиях или в потоке видеоизображений является сложной задачей. В последнее время проведено значительное число исследований в области обнаружения человека или неподвижных объектов, а также предложены различные методы их распознавания. Большинство исследований базируются на изображениях, полученных из видимого спектра, по аналогии с тем, как это воспринимается человеческим глазом. Некоторые методы используют статистические выборки на основе локальных особенностей (например, HOG — Histograms of Oriented Gradients, EOH — Edge Orientation Histograms [1]), а также методы извлечения особых точек изображения (например, SIFT — Scale Invariant Feature Transform [2], SURF — Speeded Up Robust Features [3]).

Данные методы позволяют получить достаточно точные результаты по обнаружению объектов, но являются критичными по отношению к распознаванию человека или изменению фона изображения. Это приводит к снижению точности распознавания и увеличению вычислительных мощностей, а значит, и времени распознавания объекта [4].

Для устранения указанных недостатков и распознавания объектов могут применяться данные глубин изображений, различающихся по цвету и текстуре и занимающие определенную область в пространстве. Карты глубин имеют ряд преимуществ

перед двумерными изображениями, так как являются устойчивыми к изменению цвета и освещения и простыми с точки зрения отображения [5]. Дороговизна сенсоров глубины (в которых применялись лазеры) долгое время препятствовала активному их внедрению. Однако с появлением Microsoft Kinect существенным образом может быть повышено качество и скорость распознавания подвижных препятствий (в том числе людей) при автономной навигации роботов.

Постановка задачи

На обнаружение объектов влияет ряд факторов: масштаб, место, фон и помехи, проекция, вращение и угол обзора. Для снижения их влияния необходимо разработать алгоритм обнаружения, использующий информацию о глубинах изображений, получаемых с использованием сенсоров Kinect. Для этого требуется решить две взаимосвязанные подзадачи: обнаружение подвижных объектов (людей) с применением карты глубин изображений; распознавание неподвижных объектов с использованием метода поиска ближайшего соседа.

Обозначим множество распознаваемых объектов в ближней зоне мобильного робота: $O = \{O_{\text{п}}, O_{\text{н}}\}$, где $O_{\text{п}}$ — множество подвижных объектов, $O_{\text{н}}$ — множество неподвижных объектов. Каждый объект $O_{\text{п},i}$ ($i = 1, \dots, i_{\text{п}}, i_{\text{п}}$ — число подвижных объектов) и $O_{\text{н},j}$ ($j = 1, \dots, j_{\text{н}}, j_{\text{н}}$ — число неподвижных объектов) описывается тройкой: $O_{\text{п},i} = \{T_{\text{п},i}, \Theta_{\text{п},i}, \Phi_{\text{п},i}\}$, $O_{\text{н},j} = \{T_{\text{н},j}, \Theta_{\text{н},j}, \Phi_{\text{н},j}\}$, где T — тип фигуры, Θ — геометрические размеры фигуры, Φ — угол обзора.

Для распознавания используются эталонные объекты $O_{\text{э},k}$ ($k = 1, \dots, k_{\text{э}}, k_{\text{э}}$ — число эталонных объектов), содержащиеся в базе данных системы распознавания. Тогда задача распознавания объекта в ближней зоне робота формулируется следующим образом: необходимо присвоить всем распознаваемым

мым объектам признак $\alpha = 1$, если объект распознан, и $\alpha = 0$ — в противном случае, т. е.

$$\forall O_l \in O \alpha = \begin{cases} 1, & \text{если } |f(O_l) - f(O_3)| \leq \varepsilon; \\ 0, & \text{если } |f(O_l) - f(O_3)| > \varepsilon, \end{cases} \quad (1)$$

где $f(O_l)$ — числовой показатель, характеризующий дескриптор изображения распознаваемого объекта; $f(O_3)$ — числовой показатель, характеризующий дескриптор эталонного изображения; $\alpha = 1$ — признак того, что объект распознан; $\alpha = 0$ — признак того, что объект не распознан (отсутствует в базе эталонных изображений объектов); ε — числовая граница точности распознавания объекта.

Решение задачи в такой постановке требует синтеза скоростной процедуры распознавания объектов, позволяющей обеспечить требуемую точность распознавания $\Gamma = |\Gamma' - \Gamma''|$, сократив при этом время, затрачиваемое на одновременную идентификацию подвижных $\tau_{\text{п}}$ и неподвижных объектов $\tau_{\text{н}}$ в ближней зоне работы, где $\Gamma' = f(O_l)$, $\Gamma'' = f(O_3)$.

Общий алгоритм распознавания объектов

При отсутствии света использование камер затруднительно. В последнее время в данной области произошел существенный сдвиг в связи с появлением инфракрасных сенсоров глубины, таких как Kinect [6]. Датчик глубины Kinect состоит из инфракрасного проектора, объединенного с монохромной КМОП-матрицей, что позволяет ему получать трехмерное изображение при любом естественном освещении [5]. Основа работы системы распознавания объектов — алгоритм, показанный на рис. 1. Опишем каждый из блоков.

Данные глубины. Пиксели на изображении глубины указаны калиброванными глубинами пространства перед роботом и не являются мерой интенсивностей или цветов. Получаемые изображения имеют разрешение 640×480 пикселей при 30 кадрах в секунду, разрешение по глубине — несколько сантиметров. Камеры глубины имеют ряд преимуществ перед традиционными датчиками интенсивности, работающими при низком уровне освещенности, позволяя получать калиброванную масштабную оценку, инвариантную по отношению к цвету и текстуре. Kinect также значительно упрощает решение задачи "вычитания" фона, которая используется в синтезированном алгоритме. Ключевым аспектом выполнения данного блока является синтез реалистичных глубин изображения подвижных объектов (в том числе людей).

Предварительная обработка данных глубины. Первый шаг — захват RGB-

изображения и соответствующих ему глубин. После этого выполняется предварительная обработка данных глубины, а также выделение объекта.

Kinect предназначен для измерения расстояния, начиная от 60 см до нескольких метров. Любые препятствия, расположенные вне этого диапазона, имеют нулевые значения глубин. Эти области будут давать ошибочные результаты, поэтому требуют коррекции. Для этих целей применяется ускоренный алгоритм, обрабатывающий полученные значения глубин и заменяющий нулевые значения ближайшими ненулевыми (рис. 2).

Процесс нормализации изображения обеспечивается следующей последовательностью шагов: запоминание данных о глубине в виде матрицы; поиск нулевых значений глубин; все нулевые значения глубин считаются кандидатами на фильтрацию; фильтр создает частотное распределение значений глубин, учитывая найденные глубины в каждом диапазоне для определения кандидата, который должен быть отфильтрован; если пороговое значение для каждого диапазона нарушается, то статистический режим всех значений ненулевых глубин будет применен к кандидатам, в противном случае никаких замен не проводится.

Обнаружение подвижного объекта. После подключения к Kinect происходит получение данных цвета, глубины и скелета потоков данных ("skeletondata") [4]. Блок "Предварительная обработка данных глубины" обеспечивает удаление нулевых значений глубин из массива (рис. 3). Далее обработчик событий останавливается в целях ожидания

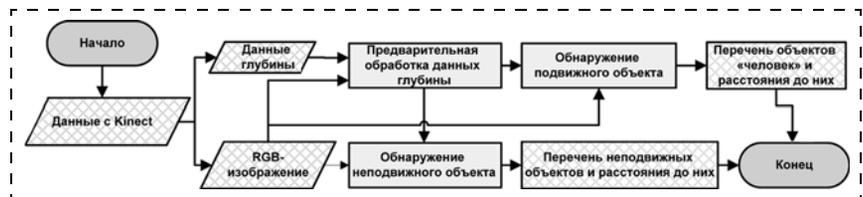


Рис. 1. Общий алгоритм распознавания объектов



Рис. 2. Получение глубин изображения с датчика Kinect:

а — интерфейс модуля; б — входное изображение; в — нормализованное изображение

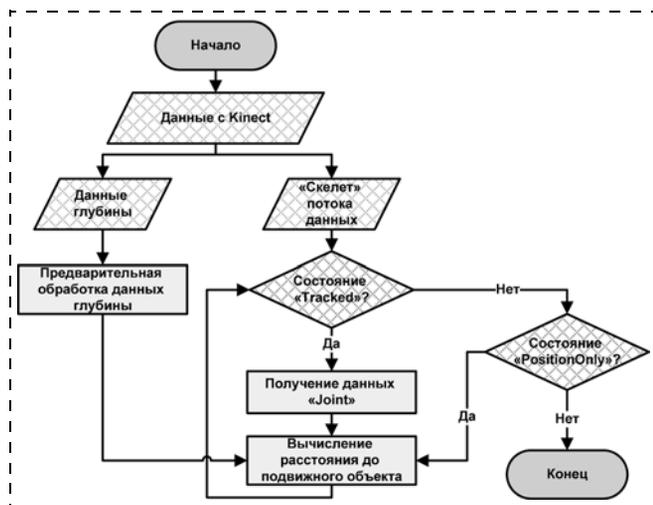


Рис. 3. Алгоритм обнаружения подвижного объекта

получения готовности всех кадров с Kinect. Наличие готовности означает, что получены данные глубин кадров, кадр цветного изображения и "скелет" кадра одновременно. Указанные данные хранятся в массивах глубины изображения, цветного изображения и точек каркаса.

Для получения местоположения людей в кадре используется информация, хранящаяся в массиве глубин [5]. Каждый пиксель в этом массиве кодирует всю информацию о глубине и объекте. При использовании битовой маски к этой части данных можно извлечь информацию об объекте "человек". Алгоритм, который Microsoft внедряет в свой комплект разработчика (SDK), возвращает местоположение человека в 200 кадров/с [4].

При использовании Kinect любые отражающие поверхности идентифицируются значениями глубины. Этот сигнал является простым способом выделения "плохих" данных. Для выдачи масштабированных данных исходные данные глубины возвращаются в виде некоторого числа пикселей и связанных с ними значений глубины в миллиметрах. Проблема преобразования пикселей в миллиметры решается с использованием функций комплекта SDK.

Ориентация конечностей (существенных признаков подвижного объекта "человек") в Kinect представляется в двух форматах: иерархическое вращение в точке, соответствующей суставу человека; абсолютная ориентация в координатах камеры Kinect. Информация об ориентации представляется в виде кватернионов и вращений матриц.

У объекта существует три состояния: Tracked (человек может быть отслежен в деталях), PositionOnly (местоположение человека получено), NotTracked (человек не может быть отслежен). Полученные данные называются Joint и имеют информацию о главных координатах человека (например, координатах центра головы, центра правой руки, центра левой руки и т. д.). Если присутствует состояние

PositionOnly, то координаты центра подвижного объекта (человека) получены.

Обнаружение неподвижных объектов. Для распознавания неподвижных объектов применяются два алгоритма: линейный поиск (требует существенных вычислительных затрат) [7] и приближенный поиск ближайших соседей (обеспечивает поиск с требуемой точностью за приемлемое время) [8].

В алгоритме поиска ближайших соседей (алгоритм NNS) существует задача оптимизации нахождения ближайших точек. Близость обычно выражается в терминах функции несходства. Однако наиболее часто применяется приближенный поиск ближайших соседей, в котором существуют три известных алгоритма: FLANN (Fast Library for Approximate Nearest Neighbors) [8], ANN (A Library for Approximate Nearest Neighbor Searching) [9], STANN (Thread-safe Approximate Nearest Neighbor) [10]. В робототехнике наиболее часто применяется алгоритм FLANN, поскольку он поддерживается в большинстве библиотек, таких как OPENCV и OPENNI [11].

В алгоритме поиска ближайших соседей применяются следующие правила расчета расстояния d между двумя точками (x и y):

$$\begin{cases} d(x, y) \geq 0, d(x, y) = 0, \text{ если } x = y; \\ d(x, y) = d(y, x); \\ d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z), \text{ если точки } x, y, z \\ \text{не лежат на одной прямой.} \end{cases}$$

Евклидово расстояние находится для упорядоченных значений атрибутов (перед расчетом расстояния необходима нормализация [12]):

$$D_E = \sqrt{\sum_i^n (x_i - y_i)^2},$$

где n — число атрибутов.

Функция несходства применяется для строковых переменных, которые не могут быть упорядочены. Она задается следующим образом:

$$d(x, y) = \begin{cases} 0, x = y; \\ 1, x \neq y. \end{cases}$$

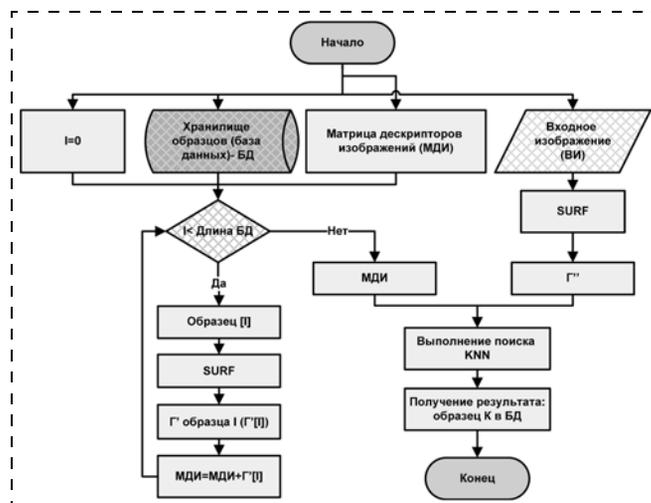


Рис. 4. Схема применения библиотеки FLANN

Обнаружение нескольких неподвижных объектов (сравнение результатов)

Число обнаруживаемых объектов	Число входных изображений	Ошибка, шт. (%)	Среднее время обнаружения объекта, мс
1	43	4 (≈9)	≈403
2	43	7 (≈16)	≈481
3	43	7 (≈16)	≈486

Таблица 2

Сравнение традиционного и параллельного программирования

№	Вид эксперимента	Число входных изображений	Среднее время обнаружения объекта, мс
1	Без применения параллельного программирования	43	402,77
2	С применением параллельного программирования	43	389,84

Поиск ближайшей точки является алгоритмом с асимптотической сложностью $O(\log N)$ в случае хаотически распределенных точек. Данный алгоритм совместно с алгоритмом аппроксимации может работать быстрее. Для решения задачи NNS используется библиотека FLANN (рис. 4). Эта библиотека содержит коллекцию следующих дескрипторов для множества изображений: создание индекса FLANN; выполнение поиска KNN; получение и вывод результатов. Для ускорения вычислений применяются следующие алгоритмы: SURF для пошагового "извлечения дескрипторов изображения"; параллельное программирование.

Эксперимент и анализ результатов

Программная реализация рассматриваемых алгоритмов была выполнена с применением библиотеки FLANN в среде разработки Visual Studio C# 2010. Эксперименты проводили для одного, двух и трех неподвижных объектов (рис. 5) на персональной ЭВМ со следующими характеристиками: центральный процессор Intel Pentium Duo T2390 с частотой 1,87 ГГц, объем оперативной памяти 1 Гб, объем видеопамати 256 Мб. Полученные результаты представлены на рис. 6.

Из табл. 1 видно, что разработанная программа успешно обнаруживает неподвижные объекты. Присутствие на рис. 6 скачков времени обусловлено тем, что алгоритм использует изображения, полученные в видимом спектре (изменяются условия освещения для различных кадров), а также из-за движения объектов по отношению к Kinect (движение мобильной платформы робота, на котором он установлен). Оба эти аспекта оказывают влияние на скорость (время) распознавания объекта.

Для сокращения среднего времени обнаружения неподвижного объекта и повышения быстродействия разработанного алгоритма применено параллельное программирование (результаты показаны на рис. 7). Наличие скачков обусловлено описанными выше причинами.

Для распараллеливания распознавания нескольких объектов применен алгоритм, входящий в состав библиотеки AForge, которая позволяет задействовать все ядра микропроцессора (по одному потоку на ядро). Таким образом, каждый объект распознается на отдельном ядре микропроцессора. В табл. 2 представлены численные значения среднего времени обнаружения объектов при использовании традиционного подхода и распараллеливания распознавания объектов (обеспечивается повышение скорости обнаружения более чем на 3 %).

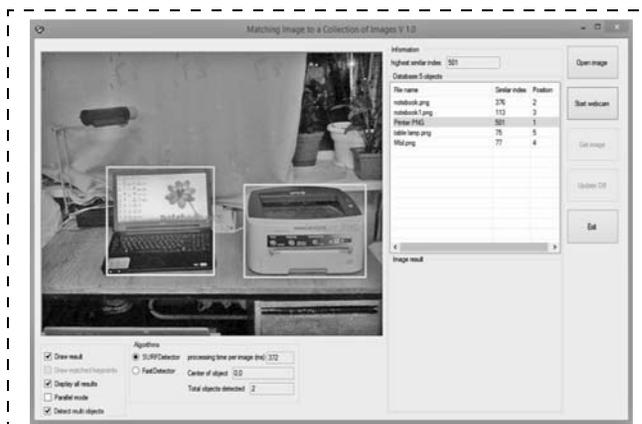


Рис. 5. Интерфейс программы распознавания неподвижных объектов

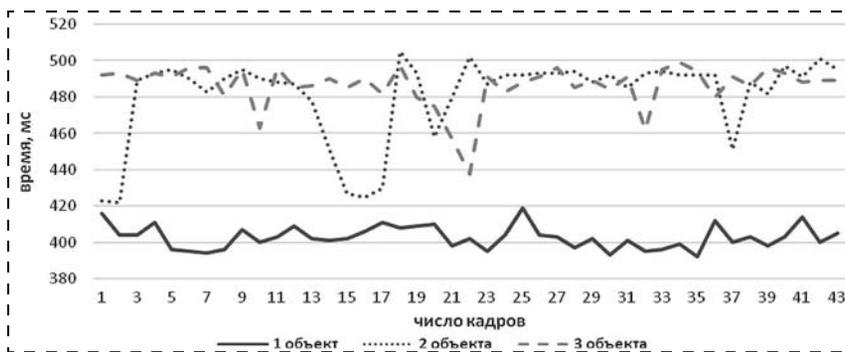


Рис. 6. Быстродействие алгоритма распознавания неподвижных объектов



Рис. 7. Сравнение результатов при традиционной реализации и при использовании параллельного программирования



Рис. 8. Интерфейс программы совместного распознавания подвижных и неподвижных объектов

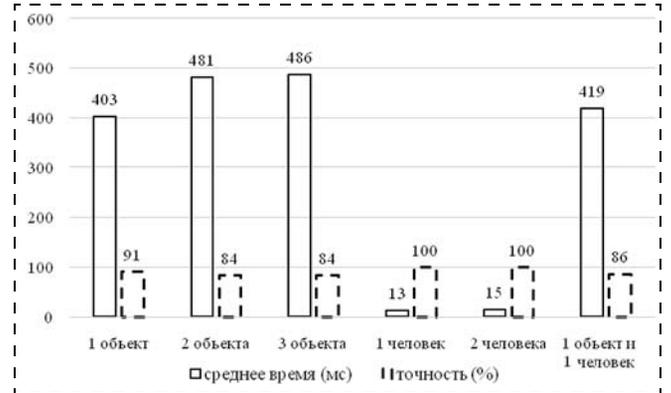


Рис. 11. Сводная диаграмма результатов исследования

Сравнительный анализ результатов

Таблица 3

№	Объекты	Число входных изображений	Ошибка, шт. (%)	Среднее время обнаружения объекта, мс
1	1 человек	43	0 (= 0 %)	13,23
2	2 человека	43	0 (= 0 %)	14,65
3	2 объекта	43	7 ($\approx 16,27$ %)	480,88
4	1 объект и 1 человек	43	2 ($\approx 4,65$ %)	419,11



Рис. 9. Быстродействие алгоритма распознавания подвижных объектов

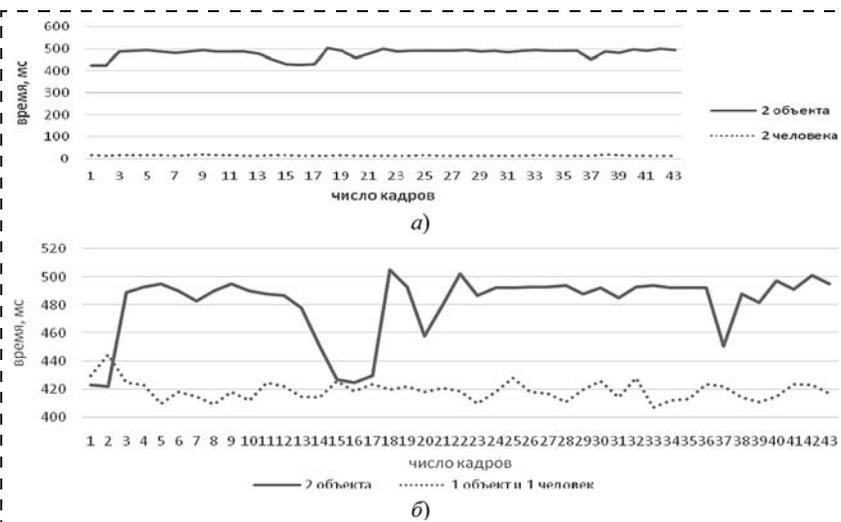


Рис. 10. Быстродействие алгоритма совместного распознавания подвижных и неподвижных объектов:

a — сравнение при распознавании двух подвижных и двух неподвижных объектов; *б* — сравнение при распознавании двух неподвижных объектов и совместного распознавания одного неподвижного и одного подвижного объекта

Вторая серия экспериментов была направлена на реализацию алгоритмов, обеспечивающих совместное распознавание подвижных (например, человек) и неподвижных объектов (например, стол, принтер и пр.), интерфейс программы представлен на рис. 8. Результаты экспериментов показаны на рис. 9, 10 и приведены в табл. 3 (расстояние до подвижного объекта "человек" — 1,9 м, а до неподвижного объекта "принтер" — 2,58 м).

Из табл. 3 видно, что при использовании Kinect обеспечивается хорошее качество распознавания подвижных объектов. Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что существует возможность совместного распознавания нескольких подвижных и неподвижных объектов в режиме реального времени с применением Kinect. Однако для увеличения быстродействия традиционных алгоритмов распознавания следует применять параллельное программирование. Для удобства сравнения полученных в рамках исследования результатов все полученные данные сведены к одной диаграмме, демонстрирующей эффективность предложенных в работе алгоритмов (рис. 11).

Заключение

Данные экспериментов показывают, что обнаружение подвижных и неподвижных объектов следует проводить с использованием различных алгоритмов. Для распознавания неподвижных объектов целесообразно применять алгоритм поиска ближайших соседей, модифицированного для применения совместно с деревьями поиска типа "человек" следует использовать встроенные алгоритмы комплекта

разработчика (SDK) Microsoft Kinect. При этом применение распараллеливания программной обработки поиска нескольких подвижных и неподвижных объектов существенно увеличивает быстроедействие алгоритма совместного распознавания объектов и повышает его точность.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что использование библиотеки FLANN совместно с Kinect SDK удовлетворяет жестким требованиям по обнаружению объектов в режиме реального времени. Это означает, что предложенный подход может применяться в системах технического зрения мобильных робототехнических платформ для получения сенсорной карты внешней среды, используемой системой управления роботом для перемещения в зданиях и сооружениях в заранее неизвестной среде.

Список литературы

1. **Navneet Dalai, Bill Triggs.** Object Detection using Histograms of Oriented Gradients. URL: <http://www.webcitation.org/6DvoEuAvL> (дата обращения: 14.10.2014).
2. **Ramisa A., Vasudevan S., Aldavert D., Toledo R., Lopez de Mantaras R.** Evaluation of the SIFT Object Recognition Method in Mo-

bile Robots. URL: http://www.iiia.csic.es/~mantaras/sift_eval.pdf (дата обращения: 14.10.2014).

3. **Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L.** Speeded-Up Robust Features (SURF) // *Computer Vision and Image Understanding*. 2008. Vol. 110, Issue 3. P. 346—359.

4. **Marron R., Janet J.** C# Implementation of SLAM Using the Microsoft Kinect. URL: http://old.ee.duke.edu/files/ece/GWD-D2012_Marron.pdf (дата обращения: 14.10.2014).

5. **Shotton J., Fitzgibbon A. Cook M., Sharp T., Finocchio M., Moore R., Kipman A., Blake A.** Real-time human pose recognition in parts from single depth images // *VISAPP International Conference on Computer Vision Theory and Applications*. February 2013. Pp. 119—135.

6. **Kefer M., Kubinger W.** Evaluation of Kinect Depth Sensor for Use in Mobile Robotics // *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium*. 2011. Vol. 22, N. 1.

7. **Knuth D.** Section 6.1: Sequential Searching. Sorting and Searching. *The Art of Computer Programming 3*. Addison-Wesley. 1997. P. 396—408.

8. **Muja M., Lowe D. G.** Fast approximate nearest neighbors with automatic algorithm configuration // *VISAPP International Conference on Computer Vision Theory and Applications*. 2009. P. 331—340.

9. **Mount D. M., Arya S.** ANN: A Library for Approximate Nearest Neighbor Searching. URL: <http://www.cs.umd.edu/~mount/ANN/> (дата обращения: 05.11.2014).

10. **Connor M.** The Simple, Thread-safe Approximate Nearest Neighbor (STANN). URL: <https://sites.google.com/a/compgeom.com/stann/Home> (дата обращения: 05.11.2014).

11. **Forsyth D. A., Ponce J.** *Computer Vision: A Modern Approach* // *Robotics and Autonomous Systems*. 2006. Vol. 11, N. 3. P. 84—92.

12. **Обзор** информации об алгоритме ближайшего соседа. URL: <http://www.basegroup.ru/library/analysis/regression/knn/> (дата обращения: 05.11.2014).

Joint Recognition of the Moving and Stationary Objects in the Machine Vision Systems of Robots

Nguyen Tuan Dung, dunghvkt@yahoo.com, **I. A. Shcherbatov**, shcherbatov2004@mail.ru, Astrakhan, 414056, Russian Federation

Corresponding author: Shcherbatov Ivan A., Ph. D., Associate Professor, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, 414056, Russian Federation e-mail: shcherbatov2004@mail.ru

Received on December 18, 2014

Accepted December 28, 2014

Simultaneous detection of multiple stationary and moving obstacles in the near field of the mobile robots is a challenging task, since a robot has to detect a maximal possible number of obstacles, and ensure its movement without collisions. In this paper, the authors propose modified algorithms for detection of objects. Detectable objects are divided into two types: familiar objects (stationary obstacles, for example, a table, a chair, a computer, etc.), and unknown objects (moveable objects — people).

The authors present specific recognition algorithms for each object type: the nearest neighbor search algorithm modified for the use with FLANN library and search trees (KNN) used for detection of the stationary obstacles; the built-in algorithms (Microsoft Kinect development kit-SDK) are intended for recognition of such moveable objects as persons. The efficiency of the search algorithm of the nearest neighbors for detection of stationary objects is shown. This algorithm is implemented in FLANN library, which contains main algorithms for extraction of the handles of images and creation of indexes. The effectiveness of finding objects is increased due to application of SURF algorithm. Use of FLANN Library together with SURF algorithm satisfies the requirements for detection of objects in real time. The experimental results prove the effectiveness of the proposed approach in a vision system of a mobile robotic platform.

Keywords: FLANN, SURF, mobile robot, image recognition, nearest neighbor search, Kinect, depth image, deep data pre-processing, Kinect SDK.

For citation:

Nguyen Tuan Dung, Shcherbatov I. A. Joint Recognition of the Moving and Stationary Objects in the Machine Vision Systems of Robots, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 7, pp. 464—470.

DOI: 10.17587/mau.16.464-470

References

1. **Navneet Dalai, Bill Triggs.** Object Detection using Histograms of Oriented Gradients, available at: <http://www.webcitation.org/6DvoEuAvL> (date of access: 14.10.2014).

2. **Ramisa A., Vasudevan S., Aldavert D., Toledo R., Lopez de Mantaras R.** Evaluation of the SIFT Object Recognition Method in Mobile Robots, available at: http://www.iiia.csic.es/~mantaras/sift_eval.pdf (date of access: 14.10.2014).

3. **Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L.** Speeded-Up Robust Features (SURF), *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, vol. 110, iss. 3, pp. 346—359.

4. **Marron R., Janet J.** C# Implementation of SLAM Using the Microsoft Kinect, available at: http://old.ee.duke.edu/files/ece/GWDD2012_Marron.pdf (date of access: 14.10.2014).

5. **Shotton J., Fitzgibbon A. Cook M., Sharp T., Finocchio M., Moore R., Kipman A., Blake A.** Real-time human pose recognition

in parts from single depth images, *VISAPP International Conference on Computer Vision Theory and Applications*. February 2013. pp. 119–135.

6. **Kefer M., Kubinger W.** Evaluation of Kinect Depth Sensor for Use in Mobile Robotics, *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium*, 2011, vol. 22, no. 1.

7. **Knuth D.** Section 6.1: Sequential Searching. Sorting and Searching. *The Art of Computer Programming 3*, Addison-Wesley, 1997, pp. 396–408.

8. **Muja M., Lowe D. G.** Fast approximate nearest neighbors with automatic algorithm configuration, *VISAPP International Conference on Computer Vision Theory and Applications*, 2009, pp. 331–340.

9. **Mount D. M., Arya S.** ANN: A Library for Approximate Nearest Neighbor Searching, available at: <http://www.cs.umd.edu/~mount/ANN/> (date of access: 05.11.2014).

10. **Connor M.** The Simple, Thread-safe Approximate Nearest Neighbor (STANN), available at: <https://sites.google.com/a/comgeom.com/stann/Home> (date of access: 05.11.2014).

11. **Forsyth D.A., Ponce J.** *Computer Vision: A Modern Approach, Robotics and Autonomous Systems*, 2006, vol. 11, no. 3, pp. 84–92.

12. **Review** information on the nearest neighbor algorithm, available at: <http://www.basegroup.ru/library/analysis/regression/knn/> (date of access 05/11/2014).

УДК 62-522.7

DOI: 10.17587/mau.16.470-475

П. А. Лошицкий, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., p.loshitskiv@rtc.ru,

Е. Е. Шеховцова, конструктор, shehovcova@rtc.ru,

Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт
робототехники и технической кибернетики

Расчет и моделирование работы промышленного манипулятора на силовых оболочковых элементах

На примере одного из вариантов промышленного манипулятора рассмотрена возможность успешного применения силовых оболочковых элементов типа "пневматический мускул" в качестве исполнительного привода в степенях подвижности манипулятора, а также показаны преимущества данной конструкции по сравнению с уже существующими аналогами.

Ключевые слова: силовой оболочковый элемент, пневматический привод, манипулятор

Введение

На сегодняшний день существует множество различных видов промышленных роботов, в которых применены различные типы приводов и реализуются различные кинематические схемы. В то же время разработчики современных робототехнических систем не очень активно применяют в своих разработках новые элементы приводной техники, предпочитая традиционные виды приводов. Такая ситуация существенно замедляет появление на рынке новых разработок в области автоматизации производственных процессов, обладающих лучшими

технично-экономическими показателями по сравнению с существующими аналогами.

По мнению авторов, одним из таких типов приводов, незаслуженно обделенных вниманием со стороны разработчиков, являются силовые оболочковые элементы (СОЭ) типа "пневматический мускул" (ПМ). СОЭ типа ПМ представляет собой гибкую трубчатую оболочку, армированную нерастяжимыми нитями, на концах которой закреплены присоединительные фланцы. При подаче сжатого воздуха в полость оболочки происходит ее расширение в диаметральном направлении и, как следствие, сокращение оболочки в осевом направлении. Более подробно о СОЭ типа ПМ (далее по тексту СОЭ) можно прочитать в работах [1–4].

На основе анализа силовых характеристик СОЭ (рис. 1) [1] можно выделить основные достоинства и недостатки силовых элементов.

К достоинствам можно отнести высокие значения развиваемого усилия, особенно в начальном положении, высокую удельную мощность и отсутствие сухого трения и люфтов между перемещающимися частями, что позволяет работать на ползучих скоростях. К основным недостаткам можно отнести малое значение перемещения относительно длины СОЭ и существенное падение развиваемого усилия при сокращении СОЭ. Тем не менее, несмотря на существенные ограничения, которыми обладает данный тип СОЭ, они могут успешно применяться в различной приводной технике, в том

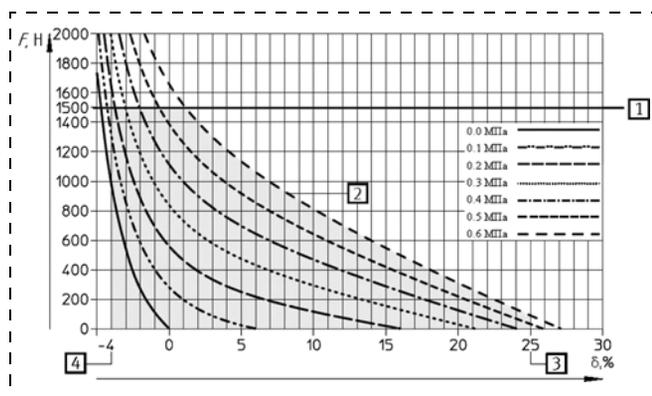


Рис. 1. Силовые статические характеристики СОЭ типа ПМ с диаметром оболочки 20 мм (F — развиваемая сила, δ — относительное сокращение СОЭ)

числе и манипуляционных системах. При этом использование СОЭ позволит существенно упростить конструкцию изделий, снизить ее стоимость и повысить надежность. Кроме того, использование пневматических приводов в ряде случаев более выгодно по сравнению с электромеханическими приводами, например, при работах на взрыво- и пожароопасных объектах. В то же время указанные недостатки СОЭ в ряде случаев могут компенсироваться за счет применения тех или иных компоновочных решений при проектировании приводов на СОЭ, что будет показано в рассматриваемом в статье примере.

Выбор кинематической схемы манипулятора и исполнительного привода

В данной статье рассмотрим возможность применения СОЭ в манипуляторах с грузоподъемностью до 2 кг, относящихся к легкой группе (от 1 до 5 кг) [5]. В основном манипуляторы рассматриваемой группы работают на конвейерных линиях, где, получая команды от технического зрения, они выполняют сортировку, укладку (установку) или отбраковку идущего по ленте конвейера продукта. Производительность таких систем составляет примерно 60...90 операций в минуту в зависимости от сложности выполняемых операций. Таким образом, можно утверждать, что в большинстве случаев рабочие зоны, в которых работает манипулятор, находятся в одной или двух плоскостях. Исходя из этого предположения рассмотрим кинематическую схему, приведенную на рис. 2.

В данной кинематической схеме присутствует линейная степень подвижности на конце стрелы манипулятора. Такая схема манипулятора позволяет избежать перемещения захватного устройства в вертикальной плоскости за счет вертикального перемещения самих губок. Это, в свою очередь, дает возможность выполнить степени подвижности 2 и 3 пассивными, движение этих степеней будет определяться движением степени подвижности 1. Возможен вариант без линейных степеней подвижности, тогда пассивной может быть только степень подвижности 3, однако в этом случае придется реализовать высокоточный привод не только в степени 1, но и в степени 2. В то же время линейную степень подвижности в захвате можно реализовать с помощью стандартного пневмоцилиндра, работающего по двум-трем положениям, что значительно выгоднее с точки зрения стоимости применяемых комплектующих. При этом надо учитывать, что расположение привода непосредственно во второй степени подвижности может не позволить достичь требуемых характеристик манипулятора из-за значительного увеличения массы стрелы манипулятора и, соответственно, ее инерционности. Как следствие, потребуются вынесение привода из второй степени подвижности на основании, что не позволит получить выгоду от упрощения конструкции по

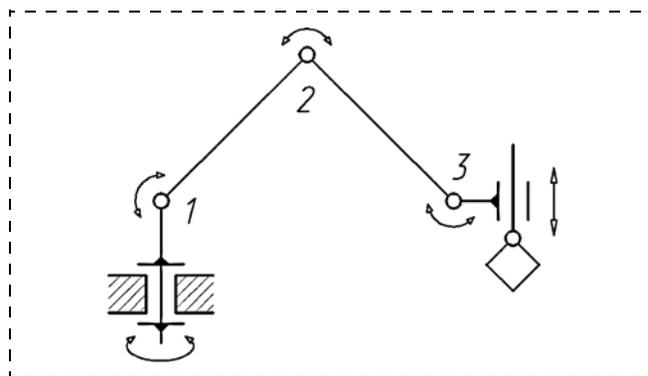


Рис. 2. Кинематическая схема манипулятора

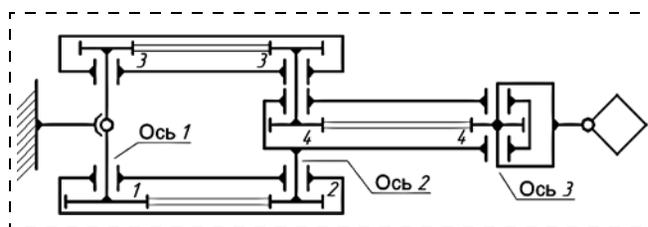


Рис. 3. Кинематическая схема манипулятора с двумя зависимыми степенями подвижности

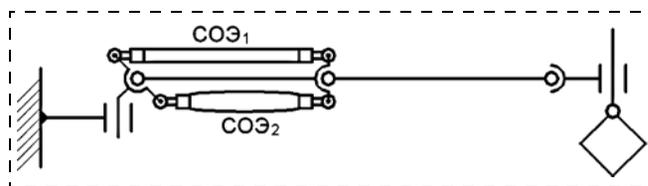


Рис. 4. Расположение СОЭ относительно звеньев манипулятора

сравнению с рассматриваемой кинематической схемой. Таким образом, кинематическая схема манипулятора, в которой реализованы зависимые степени подвижности 2 и 3 относительно степени подвижности 1, представлена на рис. 3.

В данной кинематической схеме соотношение диаметров шкивов 1 и 2 должно быть равно 2:1, это обеспечит при повороте первого звена вокруг оси на угол α поворот второго звена вокруг оси 2 на угол -2α . Диаметр шкивов 3 и 4 может быть выбран из конструктивных соображений при сохранении их расположения, как показано на рис. 4.

В связи с небольшим ходом СОЭ наиболее выгодно расположить их вдоль звена манипулятора, при этом существенного влияния на массу звена они не окажут. В то же время это позволит увеличить их ход. Расположение СОЭ относительно звеньев манипулятора представлено на рис. 4.

В данной схеме усилие, развиваемое СОЭ₁, увеличивается вместе с ростом весового момента от стрелы манипулятора, и наоборот, когда СОЭ₁ максимально сокращен и имеет минимальное усилие, нагрузка на него также минимальна. СОЭ₂ в данном случае используется как возвратный элемент и не испытывает существенной нагрузки.

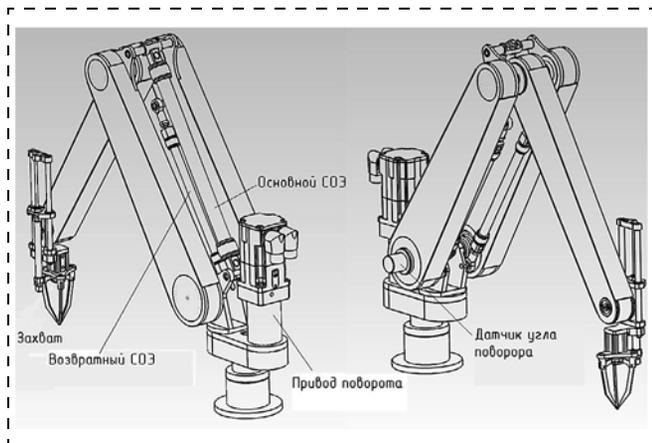


Рис. 5. Внешний вид манипулятора

Элементы манипулятора	Масса, кг	Расстояние между осями, м	Расстояние до центра масс звена, м	Момент инерции, кг·м ²
Звено 1	3,6	0,4	0,23	0,2275
Звено 2	1,6	0,4	0,21	0,096
Захватное устройство	0,9	—	—	0,0033
Нагрузка	1,5	—	—	0,0365

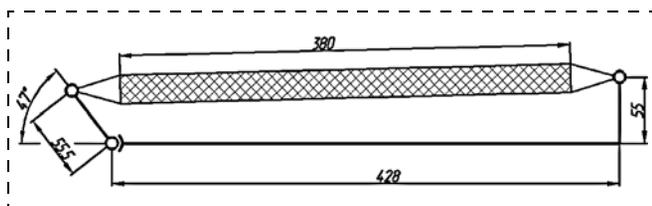


Рис. 6. Присоединительные размеры для основного СОЭ

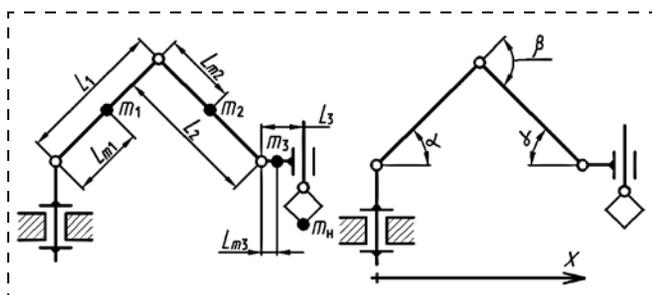


Рис. 7. Расчетная схема манипулятора

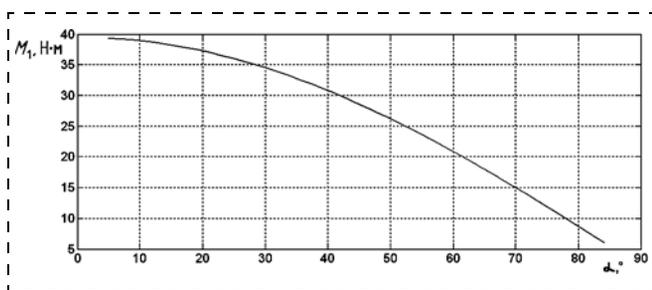


Рис. 8. Зависимость весового момента от угла наклона стрелы манипулятора

Для выбора типоразмеров СОЭ и их длин необходимо знать массу звеньев и моменты их инерции относительно осей вращения. Общий вид манипулятора представлен на рис. 5.

Данный манипулятор имеет ряд отличий по сравнению с представленной выше кинематической схемой. В нем добавлена степень подвижности для ориентации захвата. Массогабаритные параметры звеньев манипулятора и параметры нагрузки приведены в таблице, в качестве максимальной нагрузки, перемещаемой в захвате, принята нагрузка в 1,5 кг, что вполне достаточно для рассматриваемого нами круга задач.

Также в ходе компоновки было получено расположение точек для крепления СОЭ, представленное на рис. 6.

В данные габаритные размеры удалось вписать СОЭ с диаметром оболочки 20 мм и длиной 380 мм. Силовые характеристики СОЭ для данных размеров приведены на рис. 1. Данные присоединительные размеры позволяют осуществлять наклон первого звена от 5 до 85°, при этом максимальное сокращение СОЭ — 18 %, что укладывается в рабочий диапазон СОЭ (см. рис. 1).

Статический и динамический расчет манипулятора

Рассчитали весовой момент манипулятора на основе схемы, представленной на рис. 7, с использованием следующих обозначений:

l_i — длина i -го звена; l_{mi} — расстояние до i -го центра масс; m_i — масса i -го звена; J_i — момент инерции i -го звена ($i = 1, 3$); m_H, J_H — масса нагрузки и ее момент инерции относительно оси вращения захватного устройства.

Согласно кинематическим взаимосвязям имеем следующие соотношения между углами α, β и γ :

$$\beta = -2\alpha; \gamma = \alpha. \quad (1)$$

Тогда весовой момент в шарнире 1 (см. рис. 3) будет равен

$$M_1 = m_1 g L_{m1} \cos \alpha + (L_1 + L_{m2}) m_2 g \cos \alpha + ((L_1 + L_2) \cos \alpha + L_{m3}) m_3 g + ((L_1 + L_2) \cos \alpha + L_3) m_H g. \quad (2)$$

Поскольку активной является только первая степень подвижности, то нет необходимости рассчитывать момент в других степенях подвижности. При этом учтем, что в рассматриваемой конструкции манипулятора (см. рис. 5) величины L_3 и L_{m3} равны нулю, поскольку захватное устройство расположено на оси вращения последней степени подвижности. Графически зависимость (2) представлена на рис. 8.

Сравним найденную характеристику с моментом, развиваемым СОЭ.

На рис. 9 приведена расчетная схема, позволяющая связать изменения угла α , относительного сокращения СОЭ δ и плеча h приложения силы, развиваемой СОЭ.

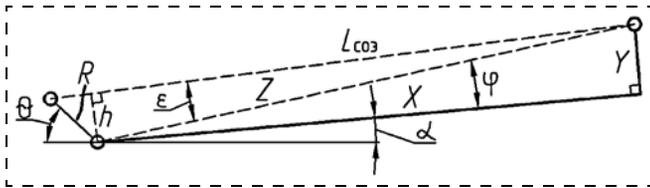


Рис. 9. Расчетная схема для определения развиваемого СОЭ момента

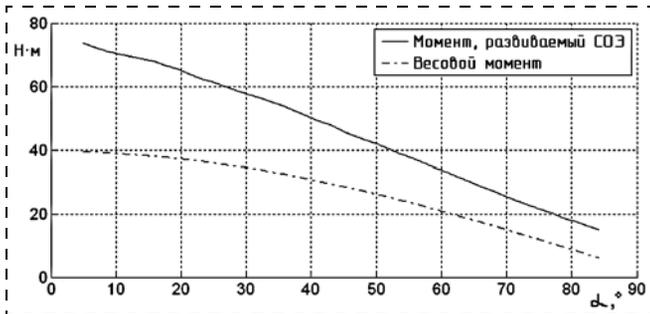


Рис. 10. Зависимость развиваемого СОЭ момента от угла наклона стрелы манипулятора

Найдем гипотенузу Z и угол φ :

$$Z = \sqrt{X^2 + Y^2}; \quad \varphi = \arctg \frac{Y}{X}. \quad (3)$$

По теореме косинусов найдем $L_{COЭ}$:

$$L_{COЭ} = \sqrt{R^2 + Z^2 - 2RZ \cos(\pi - \alpha - \varphi - \theta)}. \quad (4)$$

Угол ε найдем с помощью теоремы синусов:

$$\frac{L_{COЭ}}{\sin(\pi - \alpha - \varphi - \theta)} = \frac{R}{\sin \varepsilon}. \quad (5)$$

С учетом соотношений (5) и (3) найдем изменение плеча h :

$$h = Z \sin \varepsilon = \sqrt{X^2 + Y^2} \frac{R}{L_{COЭ}} \sin(\pi - \alpha - \theta - \arctg \frac{Y}{X}). \quad (6)$$

Относительное сокращение СОЭ δ найдем по формуле

$$\delta(\alpha) = \frac{L_{COЭ}(0) - L_{COЭ}(\alpha)}{L_{COЭ}(0)} \cdot 100 \%. \quad (7)$$

Используя силовую характеристику СОЭ (см. рис. 1) и выражения (6) и (7), построим характеристику развиваемого СОЭ момента и сравним его с моментом, найденным по формуле (2) (рис. 10).

Как видно из рис. 10, выбранный СОЭ создает достаточное усилие для преодоления весового момента. Так как данный манипулятор должен работать с достаточно высокой производительностью, динамическая нагрузка может оказаться достаточно существенной и также должна быть учтена.

Для расчета возникающих динамических нагрузок при работе манипулятора необходимо задать характер движения захвата от времени, что позволит определить перемещение всех остальных звеньев. Как уже упоминалось ранее, производительность

систем такого класса должна быть равна 60...90 операциям в минуту, поэтому зададим в качестве максимального времени подъема стрелы манипулятора значение $t_{\max} = 0,75$ с, что соответствует максимальному рабочему циклу 1,5 с. Такое значение времени выбрано исходя из того факта, что при работе манипулятор должен будет выполнять различные по продолжительности циклы, что в среднем позволит попасть в нужную производительность.

В качестве координаты перемещения захвата примем x (см. рис. 7), а в качестве переменной времени — t . Крайние положения захвата найдем из выражений:

$$\begin{aligned} x_0 &= (L_1 + L_2) \cos \alpha_0; \\ x_{\max} &= (L_1 + L_2) \cos \alpha_{\max}. \end{aligned} \quad (8)$$

Как было сказано выше, угол α изменяется от 5 до 85°.

При заданной требуемой производительности существенным вопросом становится выбор характера движения звеньев манипулятора. В целях снижения динамических нагрузок на исполнительный привод и обеспечения плавности старта и торможения захватного устройства в качестве характера движения последнего звена зададим следующие зависимости:

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) &= C_1 \sin\left(\pi \frac{2}{t_{\max}} t\right); \\ \dot{x}(t) &= -\frac{C_1 t_{\max}}{2\pi} \cos\left(\pi \frac{2}{t_{\max}} t\right) + C_2; \end{aligned} \quad (9)$$

$$x(t) = -\frac{C_1 t_{\max}^2}{4\pi^2} \sin\left(\pi \frac{2}{t_{\max}} t\right) + C_2 t + C_3.$$

Постоянные коэффициенты C_1 , C_2 и C_3 в соотношениях (9) найдем с учетом граничных условий:

$$x(0) = x_0, \quad x(t_{\max}) = x_{\max}, \quad \dot{x}(0) = 0. \quad (10)$$

Тогда имеем

$$C_2 = C_1 \frac{t_{\max}}{2\pi}, \quad C_3 = x_0, \quad C_1 = \frac{2(x_{\max} - x_0)\pi}{t_{\max}^2},$$

или

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) &= \frac{2(x_{\max} - x_0)\pi}{t_{\max}^2} \sin\left(\pi \frac{2}{t_{\max}} t\right); \\ \dot{x}(t) &= -\frac{x_{\max} - x_0}{t_{\max}} \cos\left(\pi \frac{2}{t_{\max}} t\right) + \frac{x_{\max} - x_0}{t_{\max}}; \\ x(t) &= -\frac{x_{\max} - x_0}{2\pi} \sin\left(\pi \frac{2}{t_{\max}} t\right) + \frac{x_{\max} - x_0}{t_{\max}} t + x_0. \end{aligned} \quad (11)$$

Графически найденные зависимости представлены на рис. 11.

Найдем зависимость изменения угла α от x :

$$\begin{aligned} x(t) &= (L_1 + L_2) \cos \alpha(t); \\ \alpha(t) &= \arccos\left(\frac{x(t)}{L_1 + L_2}\right). \end{aligned} \quad (12)$$

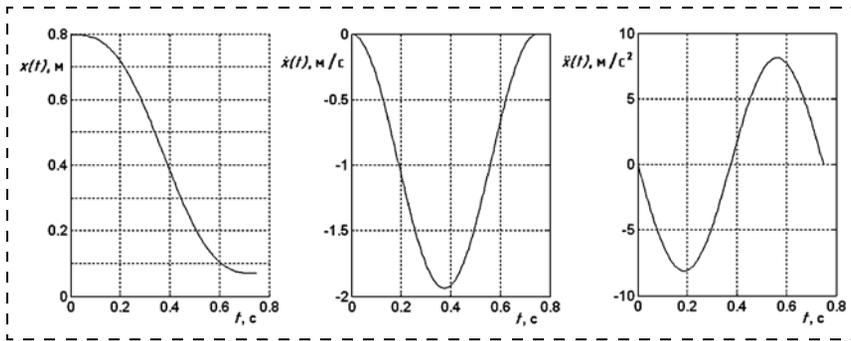


Рис. 11. Зависимости координаты, скорости и ускорения захватного устройства от времени

Найдем угловую скорость и ускорение дифференцированием соотношений (12):

$$\dot{\alpha}(t) = -\frac{\dot{x}(t)}{\sqrt{(L_1 + L_2)^2 - x(t)^2}}; \quad (13)$$

$$\ddot{\alpha}(t) = -\frac{\dot{x}((L_1 + L_2)^2 - x(t)^2) + x(t)\dot{x}(t)}{((L_1 + L_2)^2 - x(t)^2)\sqrt{(L_1 + L_2)^2 - x(t)^2}}.$$

Зная зависимости $x(t)$ и $\alpha(t)$, найдем изменение кинетической энергии системы T :

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_H, \quad (14)$$

где T_i — кинетическая энергия i -го звена; T_H — кинетическая энергия переносимого объекта.

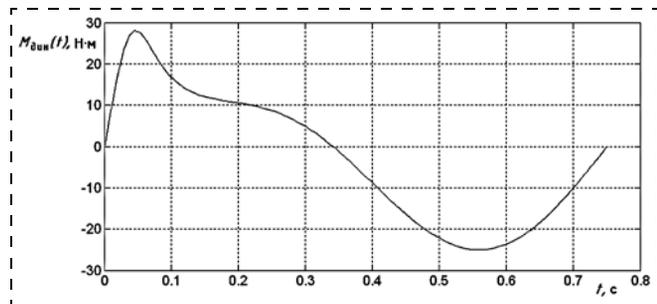


Рис. 12. Динамический момент, возникающий при работе СОЭ

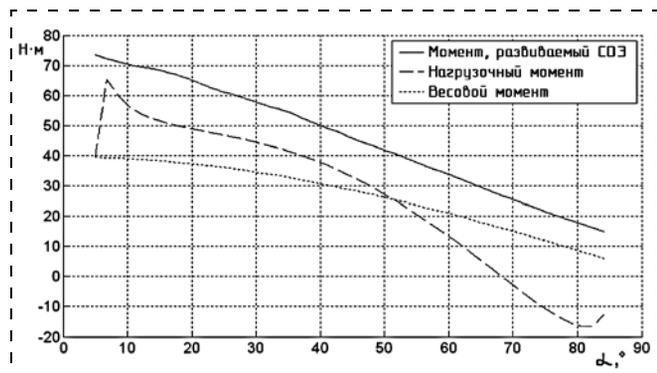


Рис. 13. Полный нагрузочный момент и момент, развиваемый СОЭ, в зависимости от изменения угла наклона стрелы манипулятора

Так как первое звено совершает только вращательные движения относительно оси 1 (рис. 3), имеем:

$$T_1 = J_1 \frac{\dot{\alpha}^2}{2}. \quad (15)$$

Второе звено перемещается в пространстве вслед за поворотом первого и при этом само совершает поворот вокруг оси 2:

$$T_2 = J_2 \frac{\dot{\beta}^2}{2} + m_2 \frac{(L_1 \dot{\alpha})^2}{2}. \quad (16)$$

Третье звено (захватное устройство) поворачивается вокруг оси 3 и совершает поступательное движение, описываемое $x(t)$:

$$T_3 = J_3 \frac{\dot{\gamma}^2}{2} + m_3 \frac{\dot{x}^2}{2}. \quad (17)$$

Для нагрузки запишем аналогичное выражение, заменив массу звена на массу нагрузки:

$$T_H = J_H \frac{\dot{\gamma}^2}{2} + m_H \frac{\dot{x}^2}{2}. \quad (18)$$

Соответственно, используя выражения (1), (11) и (13)—(18), имеем:

$$T = (J_1 + 4J_2 + J_3 + J_H + m_2 L_1^2) \frac{\dot{\alpha}^2}{2} + (m_3 + m_H) \frac{\dot{x}^2}{2}. \quad (19)$$

Работа, совершаемая СОЭ при перемещении стрелы манипулятора в каждый момент времени, будет равна кинетической энергии системы. Тогда, чтобы найти необходимую мощность исполнительного привода, продифференцируем выражение (19):

$$P(t) = \frac{dT}{dt} = (J_1 + 4J_2 + J_3 + J_H + m_2 L_1^2) \dot{\alpha} \ddot{\alpha} + (m_3 + m_H) \dot{x} \ddot{x}. \quad (20)$$

В то же время мощность рассчитывается следующим образом:

$$P(t) = M_{\text{дин}}(t) \dot{\alpha}(t), \quad (21)$$

где $M_{\text{дин}}(t)$ — динамический момент.

Тогда, используя (13), (20) и (21), найдем динамический момент:

$$M_{\text{дин}}(t) = \frac{P(t)}{\dot{\alpha}(t)} = (J_1 + 4J_2 + J_3 + J_H + m_2 L_1^2) \ddot{\alpha}(t) - (m_3 + m_H) \sqrt{(L_1 + L_2)^2 - x(t)^2} \ddot{x}(t). \quad (22)$$

Используя исходные данные из таблицы, построим зависимость (22) (рис. 12).

Используя выражения (11) и (12), можно представить зависимость (22) как функцию не времени, а угла α , подразумевая при этом, что угол α изменяется во времени согласно зависимости (12). Это позволит найти полный нагрузочный момент на СОЭ при работе манипулятора (рис. 13).

Поскольку СОЭ является приводом одностороннего действия и развивает усилие только в одном на-

правлении, то для обеспечения отрицательного момента как раз служат возвратные СОЭ (см. рис. 4, 5). Учитывая, что момент, который требуется развить возвратным СОЭ, достаточно мал (рис. 13) и при данных значениях углов возвратные СОЭ как раз развивают усилие, близкое к максимальному, данный момент будет обеспечиваться возвратными СОЭ с существенным запасом.

Вывод

Как видно из рис. 13, выбранная схема манипулятора и используемые в ней СОЭ, позволяют работать с требуемой нагрузкой при заданной производительности. К преимуществам данного манипулятора можно отнести тот факт, что перемещение захвата в заданное положение осуществляется двумя приводами в отличие от других манипуляторов, где число приводов не менее трех (например, триподы). Учитывая этот факт, данный манипулятор может успешно применяться для сортировки, отбраковки и укладки продуктов на конвейерных

лентах, выигрывая по сравнению с другими изделиями за счет более низкой стоимости. Наличие в манипуляторе дополнительных степеней подвижности, таких как линейное перемещение захвата, не окажет существенного влияния на стоимость изделия из-за своей простоты и низкой стоимости комплектующих.

Список литературы

1. **Пневмомускул** MAS. URL: http://www.festo.com/cat/ru_ru/data/doc_m/PDF/RU/MAS_RU.pdf.
2. **Sárosi J., Fabulya Z.** New Function Approximation for the Force Generated by Fluidic Muscle // *International Journal of Engineering, Annals of Faculty of Engineering Hunedoara*. 2012. Vol. 10 (2). P. 105–110.
3. **Gang Wang, Norman M. Wereley, Thomas Pillsbury.** Non-linear quasi-static model of pneumatic artificial muscle actuators // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. March 2015. Vol. 26, N. 5. P. 541–553.
4. **Шароватов В. Т., Лошицкий П. А.** Математическая модель силового оболочкового бесштокового пневмоцилиндра двустороннего действия оболочкового типа // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2012. № 4. С. 24–30.
5. **Спыну Г. А.** Промышленные роботы. Конструирование и применение. Учеб. пособ. Киев, Высшая школа, 1991, 311 с.

Calculation and Simulation of an Industrial Manipulator on the Power of the Shell Elements

P. A. Loshitskiy, p.loshitskiy@rtc.ru, **E. E. Shehovcova**, shehovcova@rtc.ru,
Central Research and Development Institute for Robotics and Technical Cybernetics,
St.-Petersburg, Russian Federation

*Corresponding author: Loshitskiy Peter A., Ph. D., Senior Researcher,
Central Research and Development Institute for Robotics and Technical Cybernetics,
St.-Petersburg, Russian Federation, e-mail: p.loshitskiy@rtc.ru*

Received on June 11, 2014

Accepted March 23, 2015

The purpose of this article is to present an example of an industrial manipulator, a possibility of successful application of power shell elements such as a pneumatic muscle as an actuator. The power shell elements have such advantages as low weight, high power density, high speed, no backlash and dry friction in the moving parts. These advantages make the power shell elements a promising actuator for various robotic systems, including manipulation. A manipulator's design calculation and its kinematic scheme make it suitable to work in the assembly lines and implement the function of sort or rejection of products. To meet these requirements, the calculation is based on the manipulator's working efficiency of 60–90 cycles per minute and capacity of up to 2 kg. These initial data present an important problem of reduction the inertia of the boom geometry. This problem is solved due to certain power actuators of the shell elements and use of the passive degrees of freedom. The article presents a possible kinematic scheme for such a manipulator, its external appearance and approximate weight and size parameters of its units. In the article the manipulator's characteristics are proved by the static and dynamic calculations. The static analysis took into consideration the current weight loads from the parts of the manipulator in its various configurations. The dynamic analysis of the selected parts of the trajectory of the manipulator is based on the most optimal mode in terms of the emerging dynamic loads and the calculations are done with their account. In order to prove a possibility of application of the force elements as actuators of the manipulator, the total load is presented, which is exerted on them by the movement of the manipulator jib, and which is compared with the characteristics of the power shell elements. At the end of the article the conclusions and analysis of the results are presented.

Keywords: power shell component, pneumatic actuator, manipulator

For citation:

Loshitskiy P. A., Shehovcova E. E. Calculation and Simulation of an Industrial Manipulator on the Power of the Shell Elements, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 7, pp. 470–475.

DOI: 10.17587/mau.16.470-475

References

1. **Пневмомускул** MAS, available at: http://www.festo.com/cat/ru_ru/data/doc_ru/PDF/RU/MAS_RU.pdf.
2. **Sárosi J., Fabulya Z.** New Function Approximation for the Force Generated by Fluidic Muscle, *International Journal of Engineering, Annals of Faculty of Engineering Hunedoara*, 2012, vol. 10 (2), pp. 105–110.
3. **Gang Wang, Norman M. Wereley, Thomas Pillsbury.** Non-linear quasi-static model of pneumatic artificial muscle actuators, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, March 2015, vol. 26, no. 5, pp. 541–553.
4. **Sharovатов V. T., Loshitskii P. A.** *Matematicheskaya model' silovogo obolochkovogo besshtokovogo pnevmotsilindra dvustoronnegо deistviya obolochkovogo tipa* (Mathematical Model of the Power Pneumocylinder without a Rod of Bilateral Action Membrane Type), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2012, no. 4, pp. 24–30 (in Russian).
5. **Spynu G. A.** *Promyshlennyye roboty. Konstruirovaniye i primeneniye* (Manufacturing automatics. Design and Application), Kiev, Vysshaya shkola, 1991, 311 p. (in Russian).

М. Ю. Рачков, д-р техн. наук, проф., michyr@gmail.com,
В. Ф. Головин, канд. техн. наук, доц., М. В. Архипов, канд. техн. наук, доц.,
Московский государственный индустриальный университет

Робототехника для специальных применений в области физиотерапии

Рассматриваются новые робототехнические системы для специальных применений в области физиотерапии. Представлены измерительные блоки робототехнических систем, которые обеспечивают адаптивные возможности функционирования систем, а также рассмотрены методы их расчета и экспериментальные характеристики. Описываются схемы систем задания такта продольного перемещения инструмента для повышения эффективности массажа, а также систем для шлейф-массажа, дающие холистический эффект. Приводится система, позволяющая контролировать глубину процессов тонизации и релаксации пациента с помощью биотехнического контура обратной связи, и перспективная система, сочетающая в себе эффект синхронного тактильного и музыкального воздействия на пациента. Все приведенные технические решения запатентованы.

Ключевые слова: робототехническая система, автоматическое управление, физиотерапия, массажный инструмент, холистический эффект

Введение

Современное развитие робототехники и компьютерных технологий открывает новые возможности использования роботов во многих специальных применениях, в том числе и в медицине. В последние годы наблюдается резкий рост интереса к созданию медицинских роботов в ведущих странах мира. Проводятся многочисленные международные симпозиумы и конференции по этой тематике. Сегодня медицинские роботы могут проводить сложные хирургические операции, ставить диагнозы и ухаживать за больными [1].

Одним из важных направлений в восстановительной медицине является массажная физиотерапия. Она заключается в совокупности приемов механического дозированного воздействия в виде трения, давления и вибрации, проводимых непосредственно на поверхности тела человека. Поскольку ручное выполнение этих действий связано с большими затратами энергии, эффективность и производительность их существенно ограничены. Снять эти ограничения помогает использование для проведения физиотерапии специальных робототехнических систем, что обеспечивает автоматизацию процедур массажа и мануальной терапии и их доступность для всех пациентов.

1. Измерительные блоки робототехнических систем

Важной задачей при создании робототехнических систем для проведения физиотерапии является обеспечение возможности выработки сигнала в систему управления манипулятором о нормальной и тангенциальной составляющих текущего массажного усилия для соответствующего управления приводами звеньев манипулятора при реализации заданных массажных процессов.

На рис. 1 изображена схема датчика усилия для измерения нормальной $F_{\text{норм}}$ и тангенциальной $F_{\text{танг}}$ составляющих текущего массажного усилия [2].

К конечному звену манипулятора жестко прикреплен кронштейн 2, который через осевой шарнир 3 связан с кронштейном 4 (рис. 1, а). Индуктивная катушка закреплена на крае кронштейна 2. Ферромаг-

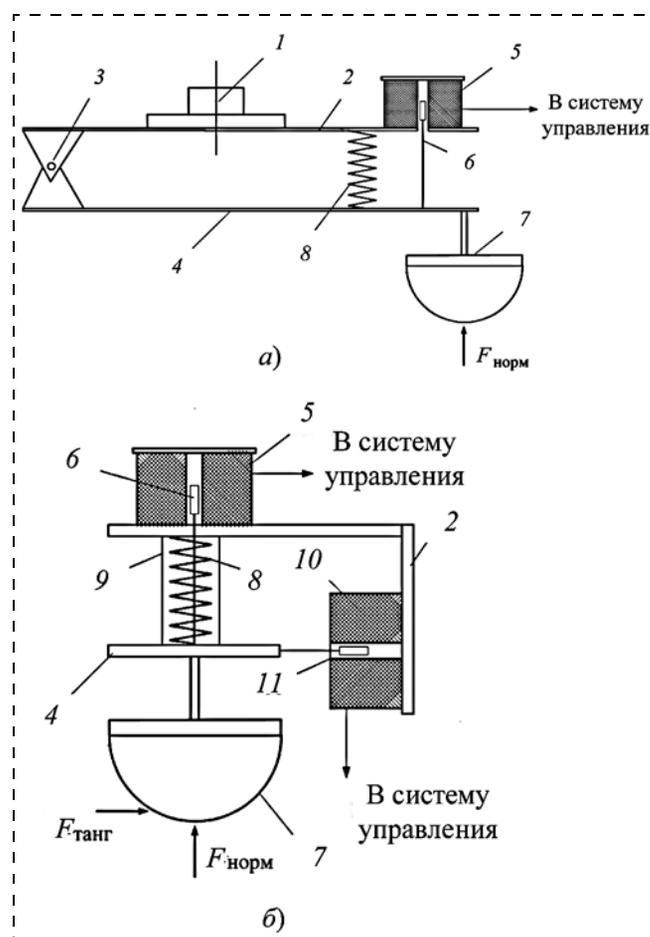


Рис 1. Схема датчика усилия для измерения нормальной и тангенциальной составляющих текущего массажного усилия (а — измерение одной составляющей усилия; б — измерение двух составляющих усилия):

1 — инструментальное звено манипулятора; 2, 4 — кронштейн; 3 — осевой шарнир; 5, 10 — катушка индуктивности; 6, 11 — сердечник; 7 — массажный инструмент; 8 — упругий элемент (пружина); 9 — шаровой шарнир

нитный сердечник 6 закреплен на кронштейне 4 с возможностью перемещения внутри индуктивной катушки 5 от нормальной составляющей усилия массажного инструмента. Между кронштейнами 2 и 4 установлен упругий элемент.

Датчик усилия также может быть выполнен с шаровым шарниром (рис. 1, б), причем на кронштейне 2 установлена вторая индуктивная катушка 10 перпендикулярно первой индуктивной катушке, при этом на кронштейне 4 закреплен второй ферромагнитный сердечник 11 с возможностью перемещения внутри второй индуктивной катушки от тангенциальной составляющей массажного усилия.

Принцип работы заключается в том, что массажный инструмент воздействует на тело пациента в соответствии с программой, управляющей электро-механическими приводами звеньев манипулятора. Значение массажного усилия формируется системой управления путем сравнения заданного и текущего массажных усилий. Заданное усилие формируется программой в соответствии с режимом массажа, а текущее усилие вырабатывается датчиком усилия.

При определении нормальной составляющей текущего массажного усилия инструмент передает это усилие на кронштейн. Преодолевая сопротивление упругого элемента, усилие преобразуется в перемещение сердечника внутри индуктивной катушки благодаря осевому шарниру. В зависимости от длины и направления перемещения индуктивность катушки изменяется пропорционально измеряемому усилию, и соответствующий выходной сигнал передается в систему управления.

Для определения тангенциальной составляющей текущего массажного усилия для более информативного формирования управления используется вторая индуктивная катушка (рис. 1, б). Поскольку шаровой шарнир позволяет кронштейну перемещаться не только в нормальном, но и в тангенциальном направлении под действием соответствующих составляющих массажного усилия, преодолевая сопротивление упругого элемента, то перемещение сердечника внутри индуктивной катушки позволяет сформировать на выходе сигнал, пропорциональный тангенциальной составляющей текущего массажного усилия. В результате в систему управления подается информация об обеих составляющих измеряемого усилия.

Массажный инструмент может быть выполнен на базе пневматической пружины, что обеспечивает управляемость его упругой податливостью при обеспечении безопасности его контакта с пациентом. В замкнутом объеме воздуха массажного инструмента в виде пневмоцилиндра без теплообмена с окружающей средой при постоянной температуре справедливо соотношение

$$p_0 h_0 = p_1 (h_0 - h_1),$$

где величины h_0 , h_1 и p_0 , p_1 — соответственно начальная и конечная высота цилиндрического объема

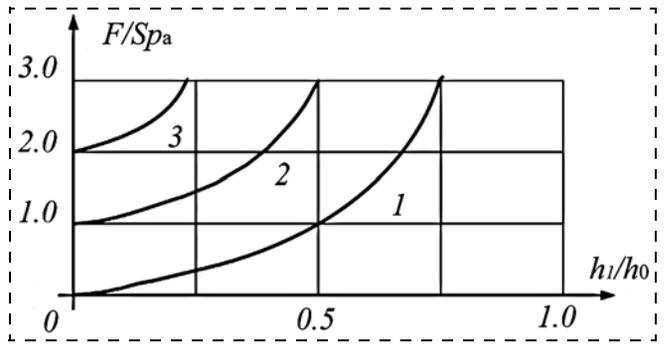


Рис. 2. Характеристики отношения упругого перемещения к приложенной нагрузке в пневмоцилиндре:

$$1 - p_0^и = 0; 2 - p_0^и = p_a; 3 - p_0^и = 2p_a$$

и начальное и конечное давление в нем. Имея в виду, что $p_0 = p_0^и + p_a$ и $F_1 = S(p_1 - p_a)$, где p_a и $p_0^и$ — атмосферное и избыточное давления соответственно, а S — площадь поршня цилиндра, имеем

$$F = Sp_a \cdot \frac{p_0^и \frac{h_1}{h_0} - p_a}{1 - \frac{h_1}{h_0}}$$

Кривые на рис. 2 построены в безразмерных координатах для трех давлений $p_0^и$ в инструменте.

Из графиков на рис. 2 видно, что в малом диапазоне, например, при $0 < h_1/h_0 < 0,1$ можно поддерживать постоянное давление, изменяя объем. В большей степени этот эффект будет выражен в случае длинного пневмоцилиндра или соединения пневмоцилиндра с ресивером, когда при необходимых смещениях поршня отношение h_1/h_0 будет незначительным. Однако в случае наличия в системе ресивера могут быть затянuty переходные процессы.

Эффективным решением стабилизации давления в пневмоцилиндре, а следовательно, развиваемого усилия, является использование стабилизаторов давления, например пневмоповторителя. Схема стабилизации давления в пневмоцилиндре при изменении хода поршня приведена на рис. 3. Пневмоповторитель (П2П.3) системы УСЭППА повторяет давление p_1 , устанавливаемое регулятором.

Положительный эффект стабилизации давления уменьшается гистерезисом в характеристике $F = F(h)$ по причине наличия сухого трения в уплотнениях цилиндра. Действительно, уравнение динамики поршня-инструмента имеет вид

$$M\ddot{z} = p_1 S - F + F_T \text{sign} \dot{z},$$

где m — масса подвижных частей; z — перемещение поршня; F_T — сила трения; S — площадь поршня в рабочей полости пневмоцилиндра. При выдвигании поршня с постоянной скоростью, когда направления z и pS совпадают, имеем

$$F = pS - F_T.$$

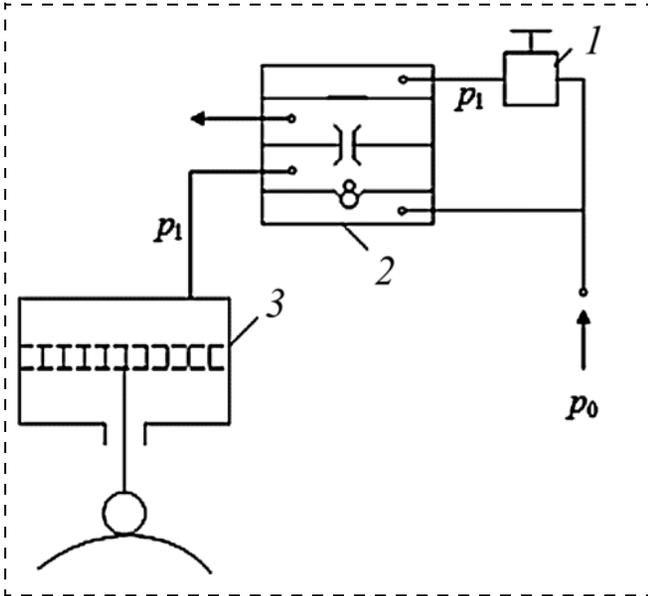


Рис. 3. Схема стабилизации давления в пневмоцилиндре массажного инструмента:
1 — регулятор давления; 2 — пневмоповторитель; 3 — поршень

В этом случае усилие инструмента на мягкую ткань будет меньше pS . Если z и pS не совпадают по направлению, имеем

$$F = pS + F_T.$$

В этом случае усилие инструмента на мягкую ткань будет больше pS .

На рис. 4 даны экспериментальные характеристики $F(h)$ для двух значений давлений.

В системе стабилизации усилия гистерезис может приводить к автоколебаниям, которые в ряде массажных процедур с вибрацией инструмента желательны.

Роль управляемой по упругости пружины может выполнять регулируемый пневмоинструмент в контуре автоматического регулирования упругости вместе с контуром автоматического регулирования

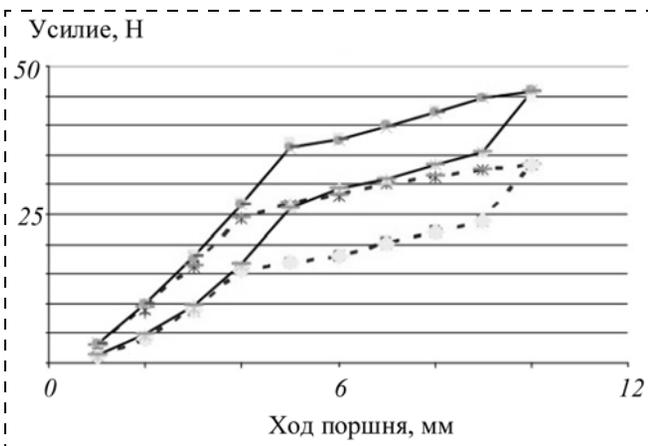


Рис. 4. Экспериментальные характеристики $F(h)$ для двух значений давлений:
— 5 атм.; - - - - 3 атм.

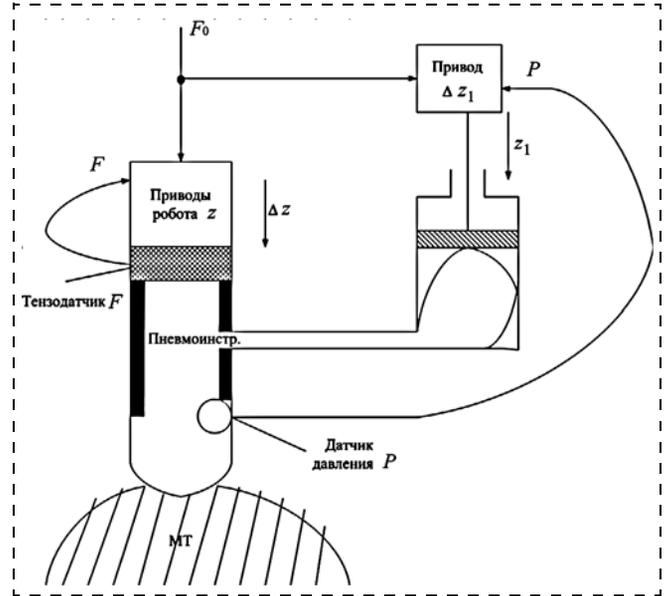


Рис. 5. Контур автоматического регулирования усилия по сигналам тензодатчика

усилия по сигналам тензодатчика (рис. 5). Достоинства данной системы заключаются в возможности регулирования усилий в большом диапазоне, изменении упругости инструмента в зависимости от заданного усилия и в отсутствии источника пневмопитания.

Усилия вдоль инструментальной оси робота развивают приводы, сравнивая заданные усилия F_0 с реальным усилием, измеряемым тензодатчиком. Это первый контур регулирования по усилию. Второй контур регулирует давление в пневмоинструменте. Давление в упругой камере пневмоинструмента создает привод Δz_1 , сжимая камеру до тех пор, пока давление, измеряемое датчиком, не сравняется с давлением, пропорциональным задаваемому усилию F_0 . При сжатии упругого пневмоинструмента изменяется его форма и площадь контактной поверхности. На рис. 6 показаны фазы сжатия упругой оболочки.

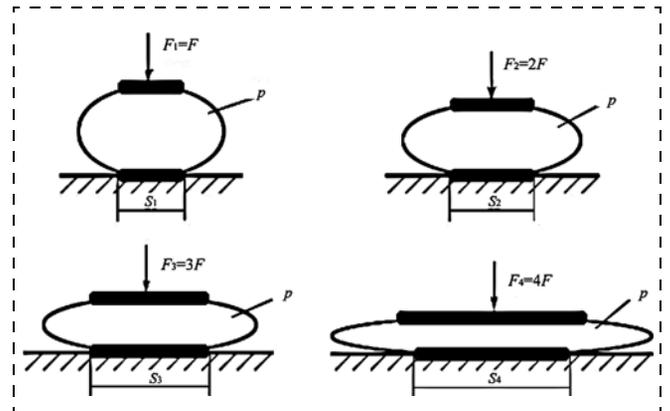


Рис. 6. Фазы сжатия упругой оболочки инструмента

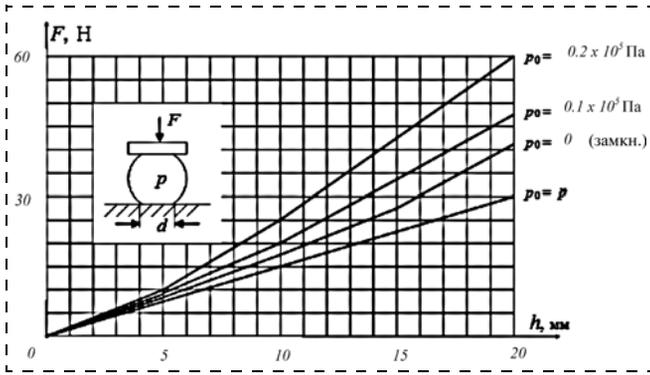


Рис. 7. Зависимости усилия F от величины сжатия оболочки h

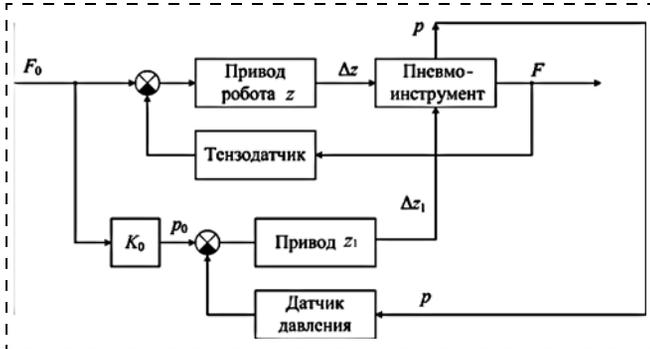


Рис. 8. Структурная схема двухконтурной системы

Если целью регулирования считать только обеспечение заданного усилия, то в герметичном пневмоинструменте будет устанавливаться некоторое давление, зависящее от площади поверхности контакта. Усилие привода F будет уравниваться силой сжатого воздуха pS и силой упругости материала упругой оболочки пневмоинструмента F_y , т. е.

$$F = pS + F_y.$$

Связи между усилием F , площадью опорной поверхности S и давлением в оболочке p нелинейные. Для их определения был проведен эксперимент. Робот сверху сжимал резиновую оболочку, в нормальном состоянии занимающую объем 88 см^3 . Усилие измерялось электронными весами, расположенными под оболочкой. Регистрировались смещение робота по вертикали h , давление в оболочке p и площадь пятна контакта S . На рис. 7 представлены кривые зависимости усилия F от сжатия оболочки h .

В двухконтурной системе с приводом Δz_1 можно обеспечивать регулирование по двум переменным: по усилию и по давлению, задавая программно величину p_0 в зависимости от F_0 . Структурная схема двухконтурной системы приведена на рис. 8.

Можно также обеспечивать регулирование по давлению независимо от задаваемого усилия, например, обеспечивать постоянное давление, отключив линию связи F_0 с p_0 .

2. Реализация специальных робототехнических систем

Известно, что эффективность массажа зависит от частоты массажных движений. Если сделать такт перемещения инструмента выше, то увеличивается тонизирующее действие. Если сделать такт перемещения инструмента равным частоте пульса в спокойном состоянии, то такой ритм будет для данного состояния оптимальным. Если требуется получить релаксирующий эффект, то такт перемещения инструмента следует понизить.

На рис. 9 приведена схема системы, обеспечивающая задание такта продольного перемещения инструмента для повышения эффективности массажа головы пациента [3].

Устройство имеет держатель в виде гибкого крепления к креслу, на основании которого закреплен массажный инструмент в виде набора подпружиненных дугообразно выгнутых спиц различной длины, свободный конец каждой из которых заканчивается наконечником. Между держателем и инструментом установлен блок автоматического перемещения инструмента в виде шагового двигателя.

Задатчик импульсных сигналов выполняется в виде датчика пульса и усилителя, вход которого соединен с выходом датчика пульса, а выход — с управляющим входом шагового двигателя. При таком выполнении задатчика импульсных сигналов частота пульса пациента будет задавать частоту перемещения массажного инструмента, передавая сигнал с датчика на управляющий вход шагового двигателя через электронный усилитель, который согласует

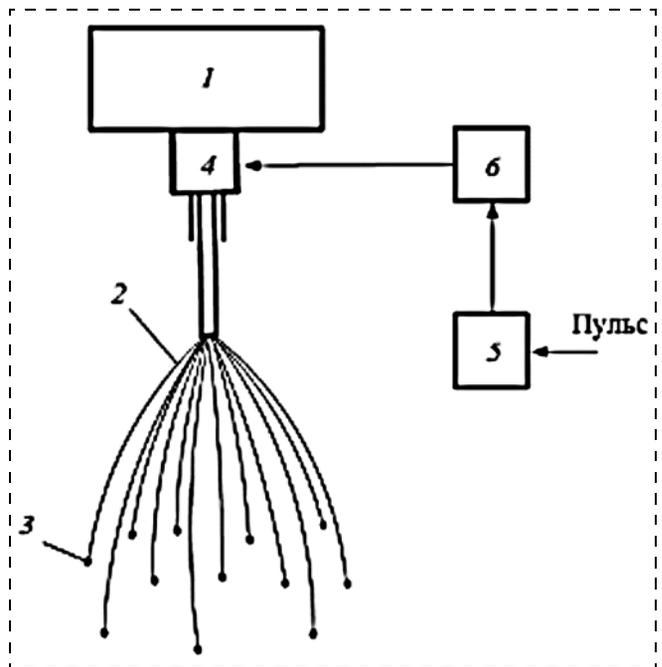


Рис. 9. Система задания такта продольного перемещения инструмента: 1 — держатель; 2 — спицы; 3 — керамические наконечники; 4 — шаговый двигатель; 5 — датчик пульса; 6 — усилитель

сигнал с датчика с требуемым значением входного сигнала двигателя.

Система для шлейф-массажа предназначена для релаксационного поглаживания на обширных участках кожного покрова человека в течение длительного времени. Этот вид физиотерапии дает эффективный результат при лечении различных заболеваний при стрессе, депрессии и нарушении сна. Поглаживающие прикосновения позволяют пациенту достичь глубокой релаксации, за счет чего высвобождаются заложенные в организме силы самовосстановления, оказывая так называемый холистический эффект. Стимулируется иммунная, нервная и гормональные системы, улучшается кровоснабжение, активизируются обменные процессы в коже, повышаются ее тонус и эластичность, уменьшаются отеки.

На рис. 10 изображена схема системы с шарнирным шлейф-массажным инструментом.

Конструкция манипулятора робота имеет направляющую штангу для каретки шлейф-массажного элемента. Первое звено шлейф-массажного элемента

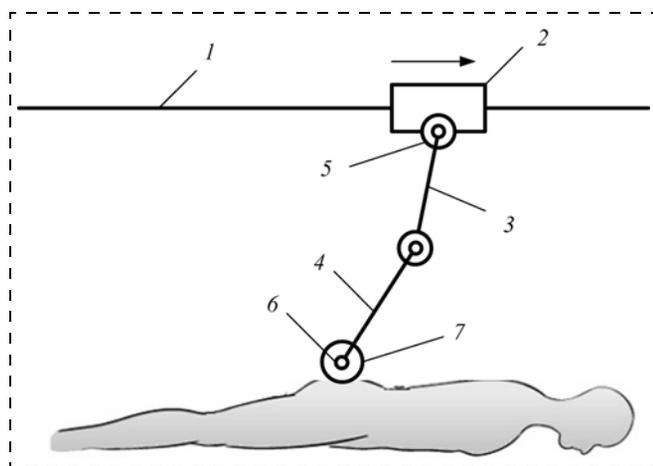


Рис. 10. Схема системы с шарнирным шлейф-массажным инструментом:

1 — штанга; 2 — каретка; 3 — первое звено; 4 — второе звено; 5, 6 — шарниры; 7 — шар с изменяемой массой

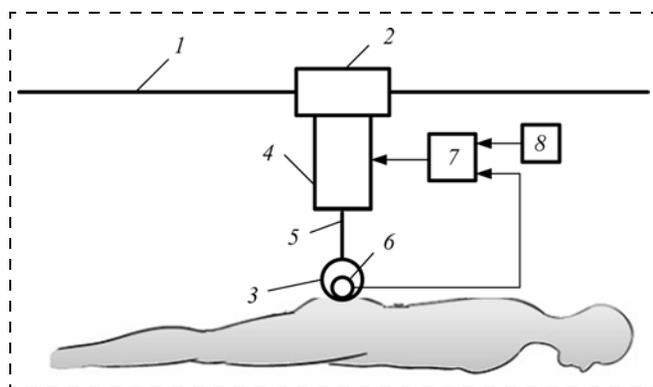


Рис. 11. Система с манипуляторным шлейф-массажным инструментом:

1 — штанга; 2 — каретка; 3 — упругий наконечник; 4 — двигатель линейного перемещения; 5 — выходной вал двигателя; 6 — датчик усилия; 7 — устройство сравнения; 8 — задатчик усилия

соединено с кареткой и со вторым звеном шарнирами, а наконечник выполнен в виде шара с изменяемой массой.

Принцип работы основан на том, что шлейф-массажный инструмент воздействует наконечником на тело пациента по сканирующей траектории в соответствии с программой, управляющей приводами каркасной конструкции со штангой в поперечном направлении и кареткой в продольном направлении. Значение массажного усилия задается дискретно изменением массы наконечника в виде шара и не меняется при движении по неплоской поверхности массажа благодаря свободным шарнирным соединениям первого и второго звеньев.

Вариантом выполнения двухзвенного шлейф-массажного инструмента является конструкция с манипуляторным инструментом (рис. 11).

Первое звено манипулятора выполнено в виде корпуса двигателя линейного перемещения, жестко соединенного с кареткой, а второе звено представляет собой выходной вал двигателя, при этом наконечник выполнен упругим и с обратной связью, состоящей из датчика усилия, установленного на его рабочей поверхности, и устройства сравнения с задатчиком усилия, причем выход датчика соединен с первым входом устройства сравнения, второй вход которого соединен с задатчиком усилия, а выход связан с управляющим входом двигателя [4].

Для обеспечения плавного автоматического регулирования массажного усилия используется обратная связь по усилию от наконечника к звеньям шлейф-массажного элемента. Требуемое значение задается задатчиком усилия, сигнал с которого сравнивается с текущим сигналом с датчика усилия, установленного на рабочей поверхности наконечника, контактирующей с поверхностью массажа, на устройстве сравнения. Если текущее усилие меньше заданного, то на двигатель подается сигнал на выдвижение его выходного вала и, следовательно, на дополнительное прижатие наконечника. Если текущее усилие становится больше заданного, то на двигатель подается сигнал на втягивание его выходного вала и соответствующее отжатие наконечника. Если текущее усилие равно заданному, то режим является номинальным, и управляющий сигнал на двигатель не вырабатывается. Упругость наконечника инструмента обеспечивает сглаживание переходных процессов его вертикального перемещения на неплоских поверхностях массажа, что обеспечивает безопасность массажа. Таким образом, обеспечивается регулирование массажного усилия в дискретном и плавном режимах и поддержание его постоянным по неплоской поверхности массажа.

Система, позволяющая контролировать глубину процессов тонизации и релаксации пациента с помощью биотехнического контура обратной связи, представлена на рис. 12 [5].

Робот имеет антропоморфные звенья манипулятора в виде предплечья и кисти, оснащенной датчиком усилия и массажным инструментом, а также

систему управления, связанную с электромеханическими приводами, датчик электрокожного сопротивления (ЭКС) и блок биотехнического управления (БТУ).

Блок биотехнического управления показан на рис. 13.

Он содержит фильтр низких частот, выход которого связан с входом первого аналого-цифрового преобразователя (АЦП), замыкатель, выход которого последовательно связан через пиковый детектор и выходной буфер напряжения с входом второго аналого-цифрового преобразователя, таймер, выход которого соединен с управляющим входом замыкателя, а также модуль ввода-вывода данных (МВВ) и центральный процессор, соединенные с магистралью, с которой связаны выходы аналого-цифровых преобразователей и вход таймера. При этом вход фильтра низких частот соединен с выходом датчика электрокожного сопротивления, информационный вход замыкателя соединен с выходом датчика усилия, а магистраль связана с системой управления.

Действие устройства основано на том, что массажный инструмент воздействует на тело пациента в соответствии с программой, управляющей электромеханическими приводами антропоморфных звеньев. Значение массажного усилия и траектория движения массажного инструмента формируются системой управления. Измерение параметров ЭКС в процессе массажа осуществляется с помощью установленного на ладони пациента датчика. Чувствительность датчика ЭКС позволяет регистрировать тонкие изменения психофизиологического состояния человека и степень тонизации или релаксации при разных видах массажа. Данный сигнал измеряется непрерывно, а выходной величиной датчика является аналоговое напряжение. Поскольку на полезную составляющую сигнала ЭКС накладываются помехи, в том числе зависящие от психического состояния пациента, необходима фильтрация низкочастотной составляющей сигнала с помощью фильтра. После фильтрации аналоговый сигнал поступает на АЦП, где преобразуется в цифровой код и передается по магистрали в центральный процессор, куда поступает информация также от датчика усилия. Процедура измерения усилия в одной точке состоит в том, что массажный инструмент надавливает на тело пациента на заданную программой глубину и задерживается в ней на время, в течение которого таймер подключает выход датчика к пиковому детектору с помощью замыкателя. Пиковый детектор позволяет из всего массива данных выделить максимальное (амплитудное) напряжение. Сигнал с пикового детектора поступает на выходной буфер, который запоминает максимальный уровень напряжения и передает его на АЦП. По истечении времени измерения усилия таймер подает сигнал на отключение замыкателя. Сигналы с датчиков позволяют судить о тонизации или ре-

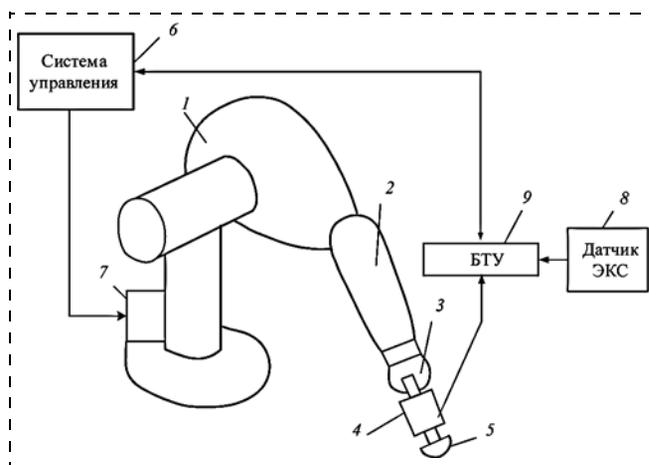


Рис. 12. Система с биотехническим контуром обратной связи: 1 — робот; 2 — предплечье; 3 — кисть; 4 — датчик усилия; 5 — массажный инструмент; 6 — система управления; 7 — электро-механические приводы; 8 — датчик электрокожного сопротивления; 9 — блок биотехнического управления

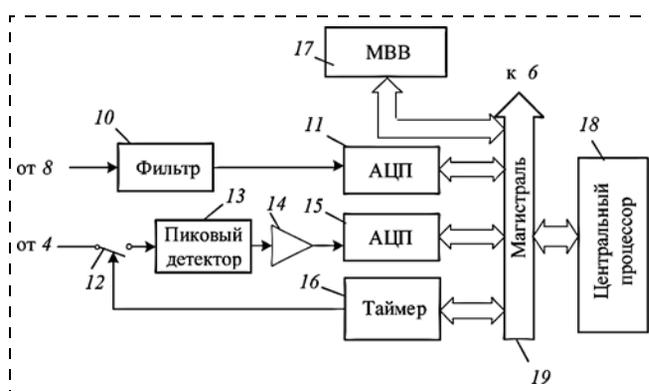


Рис. 13. Блок биотехнического управления: 1 — робот; 2 — предплечье; 3 — кисть; 4 — датчик усилия; 5 — массажный инструмент; 6 — система управления; 7 — электро-механические приводы; 8 — датчик электрокожного сопротивления; 9 — блок биотехнического управления; 10 — фильтр низких частот; 11, 15 — аналого-цифровой преобразователь; 12 — замыкатель; 13 — пиковый детектор; 14 — выходной буфер; 16 — таймер; 17 — модуль ввода-вывода данных; 18 — центральный процессор; 19 — магистраль

лаксации массируемого участка, а также о безопасности реализуемого режима массажа.

После каждого измерения сигналы с датчиков передаются по магистрали в центральный процессор и непрерывно поддерживаются на его входах до момента следующего измерения. С помощью набора правил, реализованных в центральном процессоре, формируются управляющие сигналы для коррекции массажного воздействия по силе, скорости и повторяемости воздействия на пациента с учетом информации с датчиков. После очередного режима измерения система управления корректирует указанные параметры движения массажного инструмента по информации, получаемой из магистрали и отображаемой на модуле ввода-вывода. Таким образом, достигается повышение эффективности и безопасности массажа путем контроля глубины процессов тонизации и релаксации пациента.

Следующую робототехническую систему можно условно назвать "тактильный оркестр". Эта перспективная система сочетает в себе эффект синхронного тактильного и музыкального воздействия на пациента [6].

Действие системы основано на том, что музыка влияет на сердечный ритм и кровяное давление. Музыка мозг воспринимает одновременно обоими полушариями: левое полушарие ощущает ритм, а правое — тембр и мелодию. Самое сильное воздействие на организм человека оказывает ритм. Ритмы музыкальных произведений лежат в диапазоне, близком к частоте дыхания и сердцебиения. Организм человека, слушающего музыку, как бы подстраивается под нее. В результате поднимается настроение, работоспособность, снижается болевая чувствительность, нормализуется сон, восстанавливается стабильная частота сердцебиения и дыхания. Сердце реагирует на частоту, ритм и громкость, которые могут ускорять или замедлять сердечные ритмы. Чем быстрее музыка, тем быстрее бьется сердце, а чем медленнее музыка, тем медленнее ритм сердечных сокращений. Музыка на низких частотах вызывает резонанс в нижнем отделе спины, бедрах и конечностях. По мере повышения частоты

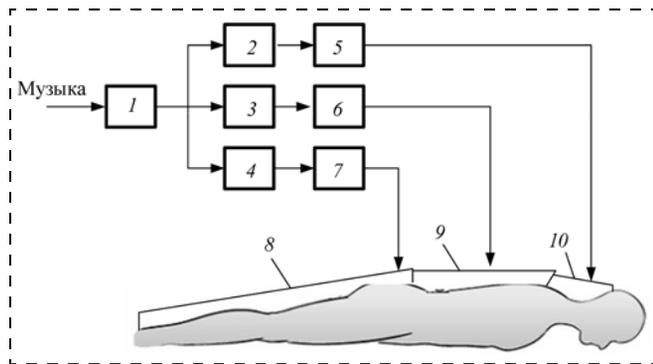


Рис. 14. Робототехническая система "тактильный оркестр" с электромеханическими вибраторами:
1 — микрофон; 2, 3, 4 — полосовые усилители; 5, 6, 7 — выпрямители; 8, 9, 10 — электромеханические вибраторы

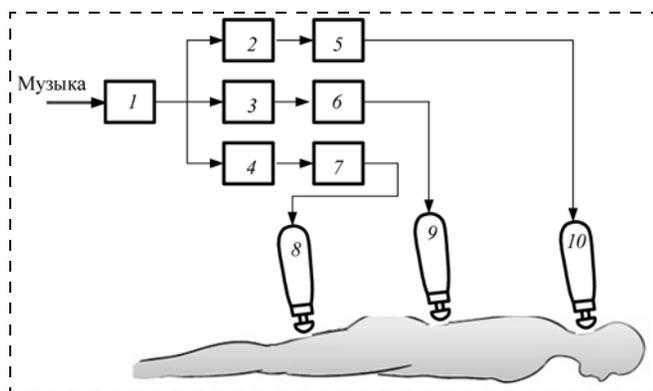


Рис. 15. Робототехническая система "тактильный оркестр" с манипуляторами:
1 — микрофон; 2, 3, 4 — полосовые усилители; 5, 6, 7 — выпрямители; 8, 9, 10 — манипуляторы

музыкального фрагмента эффекты начинают сильнее ощущаться в верхней части тела — в груди и на спине и, наконец, высокие частоты резонируют на шее и голове. Таким же образом влияет на организм темп и интенсивность массажа. Если совместить действие музыки и тактильных воздействий на пациента, то увеличивается эффективность массажа.

На рис. 14 изображена схема данной системы с электромеханическими вибраторами в виде массажного инструмента.

Конструкция содержит микрофон и три полосовых усилителя, а также три выпрямителя, выходы которых связаны соответственно с управляющими входами электромеханических вибраторов, выполненных в виде гибких матриц.

При включении музыки ее звуки преобразуются микрофоном в электрический сигнал широкого спектра. Этот спектр разбивается по трем диапазонам частот с помощью полосовых усилителей. Уровень интенсивности переменного входного сигнала формируется на выходах выпрямителей, сигнал постоянного напряжения с которых позволяет управлять в соответствии с содержанием музыки интенсивностью вибрации соответствующих электромеханических вибраторов, причем электромеханический вибратор закрепляется на конечностях и бедрах, облекая их, благодаря гибкости содержащих вибрационные элементы матриц. Электромеханические вибраторы соответственно крепятся на спине или груди и на шейном отделе пациента.

Если требуется для каждой зоны использовать свой массажный инструмент, то в качестве блоков исполнительного механизма используются манипуляторы 11, 12 и 13 (рис. 15).

Интенсивность воздействия манипуляторов через массажный инструмент на пациента регулируется в соответствии с музыкальным произведением аналогично предыдущему варианту через управляющий сигнал от выпрямителей. Траектории движения при этом задаются программно системой управления манипуляторов.

Таким образом, обеспечивается регулирование массажного усилия в соответствии с заданным внешним звуковым сигналом одновременно в разных зонах массажа, чем увеличивается его эффективность.

Заключение

В статье рассмотрены новые робототехнические системы для специальных применений в области физиотерапии. Представлены измерительные блоки робототехнических систем, которые обеспечивают адаптивные возможности функционирования систем, а также методы их расчета и экспериментальные характеристики.

Описываются схемы и принцип работы систем задания такта продольного перемещения инструмента для повышения эффективности массажа головы

пациента, а также систем для шлейф-массажа, дающих холистический эффект.

Рассмотрены система, позволяющая контролировать глубину процессов тонизации и релаксации пациента с помощью биотехнического контура обратной связи, и перспективная система, сочетающая в себе эффект синхронного тактильного и музыкального воздействия на пациента.

Результаты получены в рамках работ по гранту РФФИ 09-08-00261-а "Разработка теоретических основ, методов и алгоритмов позиционно-силового и биотехнического управления и их использование при создании человеко-машинных робототехнических комплексов для восстановительной медицины" и по гранту РФФИ 12-08-01159-а "Теоретические и экспериментальные исследования для разработки роботов для механотерапии".

Список литературы

1. **Salisbury D.** Developing robots for the hospital emergency room, Vanderbilt University. URL: <http://news.vanderbilt.edu> (дата обращения: 01.12.2012).
2. **Головин В. Ф., Рачков М. Ю., Архипов М. В., Журавлев В. В.** Манипулятор с измерительным массажным устройством, полезная модель, Патент РФ на полезную модель № 115205 от 05.10.2011.
3. **Головин В. Ф., Рачков М. Ю., Архипов М. В., Журавлев В. В.** Манипулятор для проведения массажной физиотерапии, Патент РФ на полезную модель № 121734, приоритет 27.04.2012.
4. **Головин В. Ф., Рачков М. Ю., Архипов М. В., Журавлев В. В.** Робот для шлейф-массажа, Патент РФ на полезную модель № 115206, приоритет 05.10.2011.
5. **Архипов М. В., Журавлев В. В., Головин В. Ф., Рачков М. Ю.** Биоуправляемый робот, Патент РФ на полезную модель № 105588, приоритет от 12.01.2011.
6. **Головин В. Ф., Рачков М. Ю., Архипов М. В., Журавлев В. В.** Робототехническая система для проведения массажной физиотерапии, Патент РФ на полезную модель № 121733, приоритет 27.04.2012.

Robotics for Special Applications in the Field of the Regenerative Medicine

M. Yu. Rachkov, michyur@gmail.com✉, **V. F. Golovin**, **M. V. Arkhipov**
Moscow State Industrial University, Moscow, 115280, Russian Federation

*Corresponding author: Rachkov Michail Yu., D. Sc., Professor,
Moscow State Industrial University, Moscow, 115280, Russian Federation,
e-mail: michyur@gmail.com*

Received on April 09, 2015

Accepted April 16, 2015

The article describes new robotic systems for specific applications in the field of the regenerative medicine. One of the important directions in the regenerative medicine is the massage physiotherapy. It is a combination of the dosed mechanical techniques in the form of friction, pressure and vibrations applied directly to the surface of a human body. Since a manual application of these actions involves high energy costs, their efficiency and productivity are rather limited. These restrictions can be removed due to the use in the physiotherapy of special robotic systems, which ensure automation of the massage procedures and manual therapy, and their availability for all the patients. The article presents the measuring units of the robotic systems, which ensure the systems' adaptive functionalities, and methods of their calculation and experimental characteristics. It also describes the schemes for a longitudinal movement of the tools intended to improve the effectiveness of the massage and the systems for a loop-massage, giving a holistic effect. A system is presented, which makes it possible to control the depth of the toning processes and relaxation of patients with the help of a biofeedback loop and an advanced system, combining the effect of a simultaneous tactile and musical influence on patients. The sound of music is converted by an electric microphone into an electric signal of a broad range. With the help of bandpass amplifiers this range is divided into three frequency bands. The intensity level of the AC input signal is formed on the output of the rectifiers, a DC voltage signal from which allows us to control the vibration intensity of the corresponding electromechanical vibrators in accordance with the content of the music. All the presented designs are patented.

Keywords: *robotic systems, automatic control, physiotherapy, massage tools, holistic effect*

For citation:

Rachkov M. Yu., Golovin V. F., Arkhipov M. V. Robotics for Special Applications in the Field of the Regenerative Medicine, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 7, pp. 476–483.

DOI: 10.17587/mau.16.476-483

References

1. **Salisbury D.** Developing robots for the hospital emergency room, Vanderbilt University [electronic source], available at: <http://news.vanderbilt.edu> (01.12.2012).
2. **Golovin V. F., Rachkov M. Yu., Arkhipov M. V., Zhuravlev V. V.** Manipulator with measuring massage device, utility model, RF

patent for utility model number 115205 priority 05.10.2011 (in Russian).

3. **Golovin V. F., Rachkov M. Yu., Arkhipov M. V., Zhuravlev V. V.** Manipulator for massage physiotherapy, RF patent for utility model number 121734, priority 27.04.2012 (in Russian).

4. **Golovin V. F., Rachkov M. Yu., Arkhipov M. V., Zhuravlev V. V.** Robot for loop-massage, RF Patent for utility model number 115206, priority 05.10.2011 (in Russian).

5. **Arkhipov M. V., V. V. Zhuravlev, Golovin V. F., Rachkov M. Yu.** Biocontrolled robot, RF patent for utility model number 105588, priority 12.01.2011 (in Russian).

6. **Golovin V. F., Rachkov M. Yu., Arkhipov M. V., Zhuravlev V. V.** Robotic system for massage physiotherapy, RF patent for utility model number 121733, priority 27.04.2012 (in Russian).

Б. Н. Белоусов, д-р техн. наук, проф., belousovbn@ya.ru, **Т. И. Ксенович**, докторант, taxen@mail.ru, **В. Л. Степнов**, гл. инженер, vstepnov@gmail.com, **А. С. Климачкова**, аспирант, инженер, wolff_al@mail.ru, НПЦ "Специальное машиностроение" МГТУ им. Н. Э. Баумана

Проектирование и моделирование привода рулевого управления как ключевого элемента мехатронного опорно-ходового модуля

Представлены результаты исследования электрогидравлического рулевого привода поворота колес с автономной системой гидравлического питания как ключевого элемента мехатронного опорно-ходового модуля. Приводятся особенности реализации и создания комплексной математической модели. Описывается макетный образец электрогидравлического привода поворота колеса, созданный для верификации математической модели.

Ключевые слова: мехатронный опорно-ходовой модуль, автомобиль, мобильный робот, математическая модель, всеколесное рулевое управление, автономный привод, система автоматического управления

Введение

Перед современным автомобилестроением стоит глобальная проблема — создание транспортных средств будущего. Современные тенденции развития автомобиля связаны с интеграцией электронных, электрических, гидравлических, пневматических и механических элементов и существенным повышением роли электроники и систем управления, т. е. с широким внедрением мехатронных систем и модулей в конструкцию автомобиля.

Одним из важнейших принципов мехатронного подхода является принцип модульности — членение сложных систем на более простые подсистемы. Этот принцип позволяет более глубоко и детально исследовать простые подсистемы и затем встраивать их в сложную систему. В дальнейшем процессе отрабатываются уже только связи между готовыми подсистемами. Подобный подход практически исключает внутренние ошибки при проектировании подсистем [1].

Любой мобильный робот (высокомобильная телеуправляемая транспортная платформа) представляет собой совокупность трех больших систем: транспортной, специальной и системы управления. *Транспортная система* состоит из корпуса, опорно-ходовой части (опорно-ходового модуля) и энергетической установки. В зависимости от вида среды эксплуатации мобильного робота ходовая часть может быть следующих типов: колесная, гусеничная, колесно-гусеничная, шагающая, колесно-шагающая, роторная, с петлевым, винтовым, водометным, реактивным движителями или движителями какого-либо другого типа. Возможность использования опыта отработки движителя автомобиля в процессе исследования и разработки транспортной системы мобильного робота может играть существ-

венную роль в сокращении сроков разработки. Наработки по использованию мехатроники транспортной системы мобильного робота с успехом могут быть использованы при развитии конструкции уже транспортных средств (ТС).

В лаборатории научно-производственного центра "Специальное машиностроение" МГТУ им. Н. Э. Баумана проведена серия фундаментальных и прикладных исследований по разработке теоретических основ и созданию конструкции мехатронного колесного опорно-ходового модуля (ОХМ) транспортного средства и ходовой части мобильного робота. Разработка ОХМ является актуальной задачей. Совершенство ОХМ (по числу колес, например, автомобиля) составляет опорно-ходовой комплекс или комплекс ОХМ — ходовую часть машины. Комплекс ОХМ в составе автомобиля/мобильного робота (далее просто транспортного средства (ТС)), кроме функций несущей системы и обеспечения движения, выполняет управление:

- поворотом колеса (система рулевого привода поворота колеса);
- уровнем колебаний как функции вибрационной защиты экипажа и монтируемых на него аппаратуры и оборудования (система регулируемого подрессоривания колес (РСП));
- стабилизацией горизонтирования корпуса.

Материалы данной статьи освещают вопросы, связанные с созданием системы рулевого привода поворота колеса как основного элемента системы активной безопасности ТС.

Обоснование выбора типа привода рулевого управления

Автомобили часто используются в сложных дорожных и климатических условиях, где особенно

важно свойство маневренности. Вопросы изучения рулевых приводов, маневренности, поворачиваемости и управляемости рассматриваются в работах многих отечественных и иностранных ученых [2—15]. На современных ТС с числом осей от 4 до 7 применяются в основном схемы рулевого управления, в которых управляемыми являются колеса передних осей. Однако увеличение числа передних управляемых колес с увеличением их общего числа не решает проблему улучшения маневренных свойств автомобилей такого типа. Одним из современных способов увеличения маневренности ТС является реализация всеколесного рулевого управления (ВРУ), в том числе путем применения ОХМ.

Исходя из анализа перспективных схем рулевого управления ТС [2—15] можно отметить, что привод рулевого управления автомобилей должен обеспечивать

- различные схемы поворота автомобиля;
- безопасность движения;
- заданный уровень показателей эксплуатационных свойств (управляемости, устойчивости движения и маневренности автомобиля), определяющих качество управляемого движения автомобиля.

Лучшим образом необходимым требованиям удовлетворяет рулевой привод поворота колеса с применением электрогидравлического рулевого привода, в котором гидравлическая часть используется в качестве силового устройства, а электрическая — как командное устройство.

Преимуществом гидравлических приводов, в сравнении с электрическими, являются меньший вес и меньшие габаритные размеры. Важным параметром гидравлических, а особенно, следящих приводов является их высокое быстродействие. Применение ВРУ с электрогидравлическим приводом рулевого управления позволяет отказаться от громоздкой системы промежуточных рычагов и тяг [2, 3, 16—21]. Эти приводы хорошо встраиваются в систему удаленного телерадиоуправления машинами, что особенно важно для мобильных роботов.

В конструкции автомобиля могут быть использованы привод с дроссельным регулированием и привод с объемным регулированием. Первый может подключаться как к централизованному источнику гидравлического питания, так и к автономному, второй — только к автономному. Основным недостатком централизованных приводов при их установке на многоосную колесную машину состоит в необходимости применения гидравлических магистралей большой длины, что повышает инертность рабочего тела и, как следствие, приводит к фазовому сдвигу поворота колес.

Применение автономных приводов с объемным регулированием и автономным источником гидравлического питания позволяет рассчитывать на целый ряд преимуществ:

- возможность увеличения КПД за счет отсутствия потерь на дросселирование рабочей жидкости;

- удобство обслуживания, эксплуатации и установки рулевого агрегата, поскольку исключаются трудоемкие операции по монтажу гидросистемы, требующие высокой квалификации и исключительной аккуратности персонала;
- повышение надежности, так как при выходе из строя одного из приводов остальные будут продолжать работать в нормальном режиме [22].

При создании САУ ВРУ с автономным приводом требуется обоснование параметров силовых и командных устройств этой системы, т. е. гидравлической и электрической частей электрогидравлического привода. Методики расчета подобных устройств для условий взаимодействия управляемого колеса ТС с опорной поверхностью не существует.

Особенности расчета параметров электрогидравлического привода с автономной системой гидравлического питания методом математического моделирования

Динамические свойства контура управления поворотом колеса с автономным приводом практически полностью определяются силовым цилиндром с нагрузкой и связанными с ним гидравлическими линиями распределителя (рис. 1). Это объясняется тем, что собственная частота силового цилиндра существенно ниже собственных частот других входящих устройств. Следует отметить также, что на характеристики контура существенно влияют нелинейности: трение, люфты, наличие нерастворенного воздуха в рабочей жидкости, перекрытия золотниковой пары.

При проведении расчета заданы значения давления в гидравлической системе автомобиля и параметры нагрузки, действующей на шток гидравлического цилиндра (ГЦ). Перед авторами стоит задача расчета перемещения колеса, ускорения и

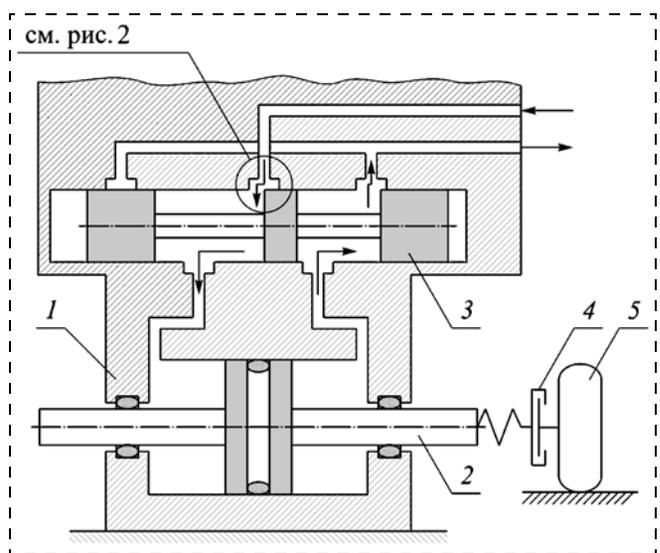


Рис. 1. Упрощенная функциональная схема золотника и гидроцилиндра с нагрузкой: 1 — силовой цилиндр; 2 — шток; 3 — золотник; 4 — кинематическая связь; 5 — колесо

угловой скорости колеса. Для нахождения искомых параметров необходимо выполнить промежуточные вычисления и рассчитать расходы рабочей жидкости через кромки золотника, которая поступает в полости силового ГЦ, и давления рабочей жидкости в полостях силового ГЦ. Универсальная модель позволяет рассчитать эти параметры, учитывая все промежуточные положения золотника, тем самым обеспечивая большую точность расчета. Рассмотрим более подробно механизм расчета.

1. Вывод уравнений расходов рабочей жидкости через кромки золотника

1.1. Вывод уравнения расхода рабочей жидкости через нагнетающую кромку полости I

Расчетная схема вывода уравнений расходов рабочей жидкости через кромки золотника приведена на рис. 2.

- *Случай* $|X_3| < L$ (X_3 — перемещение золотника, золотник в пределах перекрытия).

Суммарные потери давления при течении жидкости через перекрытие золотника определяются по формуле

$$\Sigma \Delta P = \Delta P_{\text{вх}} + \Delta P_{\text{дл}} + \Delta P_{\text{вых}}, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{вх}}$ — потери давления при входе жидкости в зону перекрытия; $\Delta P_{\text{дл}}$ — потери давления при течении жидкости через перекрытие; $\Delta P_{\text{вых}}$ — потери давления при выходе жидкости из зоны перекрытия.

Потери давления при входе жидкости в зону перекрытия ($\Delta P_{\text{вх}}$) находятся по общей формуле потерь [23]:

$$\Delta P_{\text{вх}} = \xi_{\text{вх}} \frac{\rho}{2} \cdot \frac{Q_{\text{н}}^2}{S^2}, \quad (2)$$

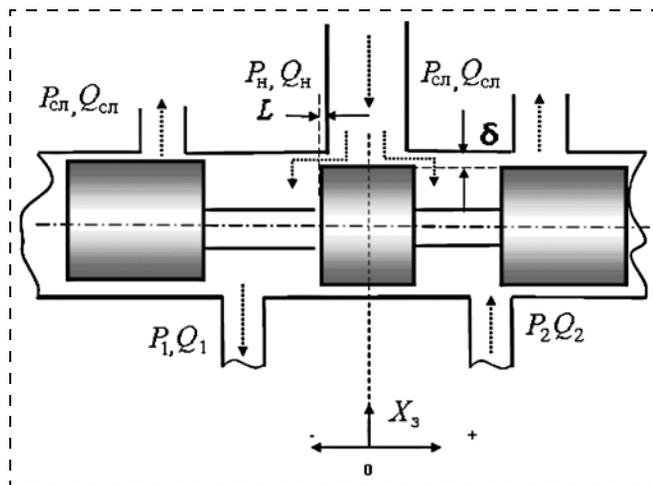


Рис. 2. Расчетная схема вывода уравнений расходов рабочей жидкости через кромки золотника: $P_{\text{н}}, P_{\text{сл}}$ — давления в нагнетающей, сливной магистралях; P_1, P_2 — давления в полости I и полости 2 гидроцилиндра соответственно; $Q_{\text{н}}, Q_{\text{сл}}$ — расходы в нагнетающей, сливной магистралях; Q_1, Q_2 — расходы в полости I и полости 2 гидроцилиндра соответственно; L — перекрытие, δ — зазор

где $\xi_{\text{вх}}$ — коэффициент местных потерь на входе; $Q_{\text{н}}$ — расход в нагнетающей полости золотника; ρ — плотность жидкости; S — площадь поперечного сечения трубы.

В рассматриваемом случае площадь поперечного сечения трубы (S) вычисляется по формуле

$$S = l_2 \delta, \quad (3)$$

где δ — диаметральный зазор (рис. 2); l_2 — суммарная ширина окна золотника.

Потери давления при течении жидкости через перекрытие ($\Delta P_{\text{дл}}$) находятся по общей формуле определения утечек через зазор между двумя параллельными пластинами [23]:

$$\Delta P_{\text{дл}} = \frac{12\nu\rho L_3}{l\delta^2} \cdot Q_{\text{н}}, \quad (4)$$

где ν — кинематическая вязкость жидкости; ρ — плотность жидкости; L_3 — длина зазора; $Q_{\text{н}}$ — расход в нагнетающей полости золотника; δ — диаметральный зазор (рис. 2); l — ширина окна золотника.

В рассматриваемом случае длина зазора равна

$$L_3 = L - X_3, \quad (5)$$

где L — длина перекрытия (рис. 2); X_3 — перемещение золотника.

Потери давления при выходе жидкости из зоны перекрытия ($\Delta P_{\text{вых}}$) находятся по общей формуле потерь [23]:

$$\Delta P_{\text{вых}} = \xi_{\text{вых}} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{Q_{\text{н}}^2}{S^2}, \quad (6)$$

где $\xi_{\text{вых}}$ — коэффициент местных потерь на выходе; $Q_{\text{н}}$ — расход в нагнетающей полости золотника; ρ — плотность жидкости; S — площадь поперечного сечения трубы.

Учтем, что

$$\rho = \frac{\gamma}{g}, \quad (7)$$

где ρ — плотность жидкости; γ — удельный вес жидкости.

Таким образом, после подстановки уравнений (2)–(7) в уравнение (1) уравнение, связывающее перепад давления на нагнетающей кромке полости I золотника и расход через кромки золотника принимает вид

$$\begin{aligned} P_{\text{н}} - P_1 &= \xi_{\text{вх}} \cdot \frac{\gamma}{2g} \cdot \frac{Q_{\text{н}}^2}{(l_2 \delta)^2} + \\ &+ \frac{12\nu\rho(L - X_3)}{l_2 \delta^3} \cdot Q_{\text{н}} + \xi_{\text{вых}} \cdot \frac{\gamma}{2g} \cdot \frac{Q_{\text{н}}^2}{(l_2 \delta)^2} = \\ &= (\xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{вых}}) \cdot \frac{\gamma}{2g} \cdot \frac{Q_{\text{н}}^2}{(l_2 \delta)^2} + \frac{12\nu\rho(L - X_3)}{l_2 \delta^3} \cdot Q_{\text{н}}, \quad (8) \end{aligned}$$

где P_H — давление на нагнетательной кромке золотника; P_1 — давление в полости ГЦ; ρ — плотность жидкости ($\rho = \gamma/g$).

После подстановки постоянных величин $\xi_{\text{вых}} + \xi_{\text{вх}} = 1,5$, $g = 981 \text{ см/с}^2$ в формулу (8) и приведения размерностей, получаем

$$\begin{aligned} & |P_H - P_1| = \\ & = 7,65 \cdot 10^{-7} \gamma \cdot \frac{Q_H^2}{(l_\Sigma^2 \delta^2)} + 1,22 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\nu \rho (L - X_3)}{l_\Sigma \delta^3} \cdot Q_H. \end{aligned} \quad (9)$$

Введем коэффициенты

$$a = 7,65 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\gamma}{(l_\Sigma^2 \delta^2)}, \quad b_H = 1,22 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\nu \rho (L - X_3)}{l_\Sigma \delta^3},$$

$$c_H = |P_H - P_1|.$$

Тогда уравнение (9) принимает вид

$$a Q_H^2 + b_H Q_H - c_H = 0. \quad (10)$$

Решение квадратного уравнения (9) связывает Q_H и перепад давлений на кромке:

$$Q_H = \frac{-b_H + \sqrt{b_H^2 - 4ac_H}}{2a} \cdot \text{sign}(P_H - P_1). \quad (11)$$

- *Случай $|X_3| \geq L$ (золотник вышел за пределы перекрытия).*

В этом случае отсутствуют потери по длине. Нетрудно заметить, что при $X_3 = L$ площадь окна совпадает с площадью окна (3) в уравнении (1). Решение уравнения (1) относительно Q_H принимает вид

$$\begin{aligned} Q_H = & 1,143 \cdot 10^3 l_\Sigma \sqrt{\delta^2 + (X_3 - L)^2} \cdot \sqrt{\frac{|P_H - P_1|}{\gamma}} \times \\ & \times \text{sign}(P_H - P_1), \end{aligned} \quad (12)$$

где Q_H — расход в нагнетающей полости золотника; δ — диаметральный зазор (рис. 2); l_Σ — суммарная ширина окна золотника; γ — удельный вес жидкости; L_3 — длина зазора; X_3 — перемещение золотника; P_H — давление на нагнетательной кромке золотника; P_1 — давление в полости ГЦ.

1.2. Вывод уравнения расхода рабочей жидкости через сливную кромку полости 1

Очевидно, что общий вид уравнения в этом случае совпадает с общим видом уравнений (11) и (12), в которых следует заменить $P_H - P_1$ на $P_1 - P_{\text{сл}}$ и $X_3 - L$ на $L + X_3$.

В результате получаем уравнения для двух случаев:

- при $|X_3| < L$ (золотник в пределах перекрытия)

$$Q_{\text{сл}} = \frac{-b_{\text{сл}} + \sqrt{b_{\text{сл}}^2 - 4ac_{\text{сл}}}}{2a} \cdot \text{sign}(P_1 - P_{\text{сл}});$$

- при $|X_3| \geq L$ (золотник вышел за пределы перекрытия)

$$\begin{aligned} Q_{\text{сл}} = & 1,143 \cdot 10^3 l_\Sigma \sqrt{\delta^2 + (L + X_3)^2} \cdot \sqrt{\frac{|P_1 - P_{\text{сл}}|}{\gamma}} \times \\ & \times \text{sign}(P_1 - P_{\text{сл}}). \end{aligned}$$

1.3. Уравнение расхода через нагнетательную и сливную кромки полости 2

Аналогично выводятся уравнения для полости 2 золотника при учете соответствующих замен знаков в выражениях, связывающих перемещение золотника X_3 и зазор L .

2. Вывод уравнений давлений в полостях силового ГЦ

2.1. Вывод уравнения давления в полости 1 ГЦ

Уравнение расхода рабочей жидкости через полость силового цилиндра с учетом того, что изменение плотности рабочей жидкости пренебрежимо мало, в общем виде имеет вид [22]

$$\Sigma Q_1 - \Sigma Q_2 = \frac{dV}{dt} + \frac{V}{E} \cdot \frac{dP}{dt}, \quad (13)$$

где Q_1, Q_2 — расходы рабочей жидкости через кромки золотника; V — объем полости силового ГЦ; P — давление в полости гидроцилиндра; E — модуль упругости жидкости.

После преобразований [22] уравнение (15) принимает вид

$$\Delta P = (Q_{\text{зол}} - S_{\text{п}} \dot{x}_{\text{п}}) \frac{E}{V_{\text{п}}} \Delta t, \quad (14)$$

где ΔP — изменение давления в полости 1 ГЦ; $Q_{\text{зол}}$ — разность расходов рабочей жидкости через кромки золотника ($Q_{\text{зол}} = \Sigma Q_1 - \Sigma Q_2$); $S_{\text{п}}$ — площадь поршня; $x_{\text{п}}$ — перемещение поршня; E — модуль упругости жидкости; $V_{\text{п}}$ — объем полости силового ГЦ.

Текущее давление в полости ГЦ:

$$P_1 = \sum_0^{\infty} \Delta P. \quad (15)$$

Следует отметить, что наличие нерастворенного воздуха в рабочей жидкости и давление в полости приводят к заметному изменению модуля упругости:

$$E' = E \cdot \frac{1}{1 + \frac{V_{\text{в}}}{V_{\text{ж}}} \frac{E}{P_1}}, \quad (16)$$

где $V_{\text{в}}/V_{\text{ж}}$ — соотношение объемов нерастворенного воздуха и жидкости; P_1 — давление в полости 1 гидроцилиндра.

После подстановки уравнений (13)–(16) окончательно уравнение расходов через полость силового цилиндра, решенное относительно давления в этой полости, принимает вид

$$P_1 = \sum_0^{\infty} (Q_{\text{зол}} - S_{\text{п}} \dot{x}_{\text{п}}) \cdot \frac{E}{(V_0 + S_{\text{п}} x_{\text{п}}) \left(1 + \frac{V_{\text{в}}}{V_{\text{ж}}} \frac{E}{P_1}\right)}, \quad (17)$$

где P_1 — давление в полости гидроцилиндра; $Q_{\text{зол}}$ — расход рабочей жидкости через золотник; $S_{\text{п}}$ — площадь поршня; $x_{\text{п}}$ — перемещение поршня; $V_{\text{в}}/V_{\text{ж}}$ — соотношение объемов нерастворенного воздуха и жидкости.

2.2. Вывод уравнения давления в полости 2 ГЦ

Очевидно, что при увеличении одной из полостей силового цилиндра, давление в которой описывается уравнением (17), объем другой полости будет уменьшаться:

$$P_2 = \sum_0^{\infty} (Q_{\text{зол}} - S_{\text{п}} \dot{x}_{\text{п}}) \cdot \frac{E}{(V_0 - S_{\text{п}} x_{\text{п}}) \left(1 + \frac{V_{\text{в}}}{V_{\text{ж}}} \frac{E}{P_2}\right)}$$

3. Вывод уравнения перемещения поршня гидроцилиндра

Параметры движения поршня силового гидроцилиндра определяются силами, действующими на него со стороны потока жидкости, а также внешними силами:

$$(P_1 - P_2)S_{\text{п}} = m_{\text{п}} \ddot{x}_{\text{п}} + k_{\text{д}} \dot{x}_{\text{п}} + c_{\text{кин}}(x_{\text{п}} - x_{\text{к}}) + F_{\text{тр}} \text{sign}(\dot{x}_{\text{п}}),$$

где P_1, P_2 — давление в полости 1, 2 гидроцилиндра; $S_{\text{п}}$ — площадь поршня; $m_{\text{п}}$ — масса поршня; $x_{\text{п}}$ — перемещение поршня; $k_{\text{д}}$ — коэффициент демпфирования; $c_{\text{кин}}$ — кинематическая жесткость; $F_{\text{тр}}$ — сила трения; $x_{\text{к}}$ — перемещение колеса.

Перемещение поршня определяется как

$$x_{\text{п}} = \int_0^{\infty} \dot{x}_{\text{п}} dt.$$

4. Вывод уравнения движения колеса

Параметры движения колеса определяются действующими на него силами:

$$(\varphi_{\text{ст}} - \varphi_{\text{к}})c_{\text{ш}} = J_{\text{к}} \ddot{\varphi}_{\text{к}} + k_{\text{дк}} \dot{\varphi}_{\text{к}} + M_{\text{тр}} \text{sign}(\dot{\varphi}_{\text{к}}),$$

где $\varphi_{\text{к}}$ — угол поворота колеса; $\varphi_{\text{ст}}$ — угол поворота ступицы колеса; $c_{\text{ш}}$ — кинематическая жесткость шины; $k_{\text{дк}}$ — коэффициент демпфирования шины; $J_{\text{к}}$ — момент инерции колеса; $M_{\text{тр}}$ — приведенный момент трения в кинематике рулевого управления.

Угол поворота колеса определяется как

$$\varphi_{\text{к}} = \int_0^{\infty} \dot{\varphi}_{\text{к}} dt.$$

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет рассчитать следующие параметры:

- расходы через кромки золотника с учетом влияния нерастворенного воздуха на динамику привода и перекрытий золотниковой пары;
- давления в полостях силового ГЦ с учетом влияния контакта колеса с дорогой, перемещения, угловых скоростей, ускорений колеса.

Макетный образец электрогидравлического привода поворота колеса

Результаты моделирования силового цилиндра и связанного с ним золотника используются в блоке математической модели электрогидравлического привода, который, в свою очередь, входит в качестве самостоятельного блока в комплексную математическую модель криволинейного движения ТС (рис. 3).

На основе результатов математического моделирования был разработан и изготовлен макетный образец электрогидравлического привода поворота колеса ТС в составе ОХМ, который использован для верификации математической модели методом физического моделирования на стенде. Для проведения испытаний на стенде установлена система с автономным регулированием питания рабочей жидкости. Конструктивно стенд (рис. 4) включает в себя механическую, гидравлическую и электронную части (АЦП — преобразователь напряжения измерительный; БП ДД — блок питания датчика давления; БУ ЭД — блок управления электродвигателем; ДД — датчик давления; ДОС — датчик обратной связи (угла поворота колеса); Н — насос гидравлический; ПГА — гидропневматический аккумулятор; ЭГР — электрогидравлический распределитель; ЭД — электродвигатель; ЭЧ ССУ ПК — электронная часть системы управления поворотом колеса).

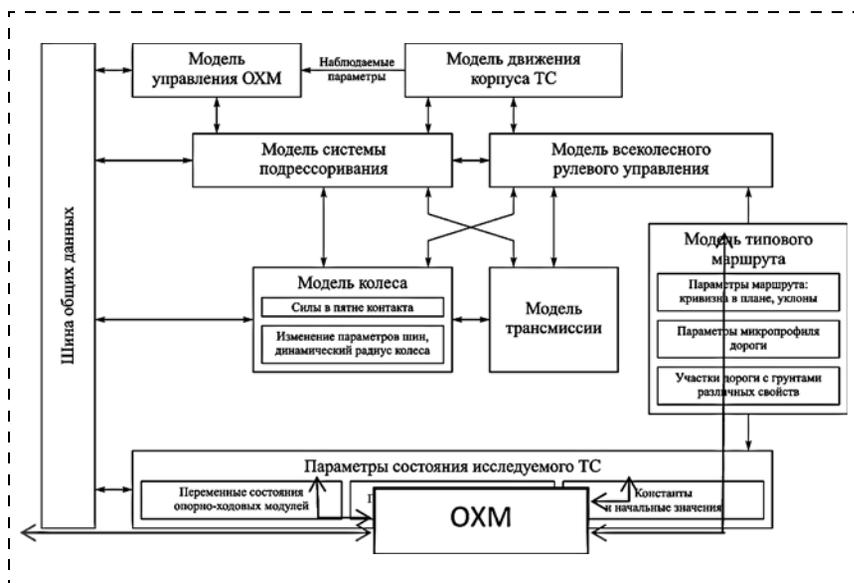


Рис. 3. Блок-схема комплексной математической модели ТС



Рис. 4. Стенд для физического моделирования электрогидравлического привода поворота колеса опорно-ходового модуля

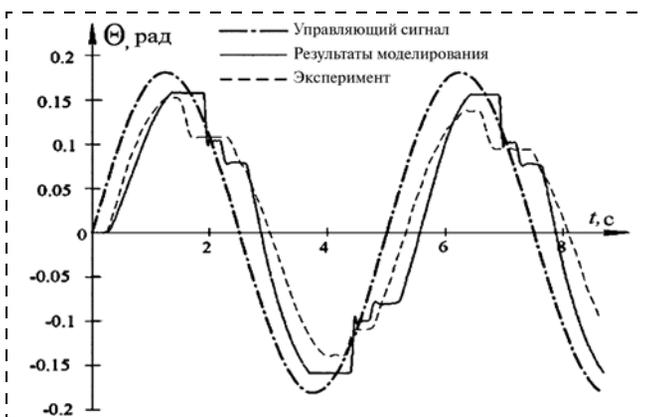


Рис. 5. Реализация имитационной модели поворота колеса "на месте"

Результаты физического моделирования подтвердили адекватность математических моделей. Пример совпадения результатов имитационного и физического моделирования для стандартного случая испытаний поворота колеса "на месте" приведен на рис. 5.

Заключение

В качестве резюме можно сказать следующее. Созданию мехатронного колесного модуля для автомобилей и транспортных систем мобильных роботов способствовала разработка комплексной математической модели. Результаты моделирования достаточно точно обосновывают параметры составных частей электрогидравлического привода с автономной гидросистемой ВРУ. Результаты физического моделирования подтвердили адекватность математических моделей. Хорошая сходимость с результатами математического моделирования позволяют дать рекомендации о целесообразности дальнейших исследований автономного рулевого привода, а также разработки документации и изготовления макетного образца автономного привода с последующими его испытаниями в составе автомобиля и транспортной системы мобильного робота.

Полученные результаты исследования являются научно-техническим заделом для создания мехатронных модулей и систем транспортных средств. Создание подобных модулей еще раз доказывает существенное сближение конструкции автомобиля и мобильного робота. А идеальный автомобиль будущего — мобильный робот различного назначения.

Список литературы

1. Подураев Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение: учеб. пособие для студентов вузов. М.: Машиностроение, 2006. 256 с.
2. Белоусов Б. Н., Попов С. Д. Колесные транспортные средства особо большой грузоподъемности. Конструкция. Теория. Расчет. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 728 с.
3. Белоусов Б. Н., Шухман С. Б. Прикладная механика наземных тягово-транспортных средств с мехатронными системами. М.: Агроконсалт, 2013. 612 с.
4. Белоусов Б. Н., Болдорев А. Г., Наумов С. В., Федотов И. В. Модель взаимодействия управляемых систем поддрессирования колес и всеколесного рулевого управления как подсистем их активной // Автомобильная промышленность. 2007. № 2. С. 5—9.
5. Experimental verification of mathematical model of interaction of the wheel with the support surface at non-stationary rolling modes / B. N. Belousov et al. // Problems of Machine-Building and Reliability of Vehicles. 2009. N. 5. P. 111—115.
6. Autonomous Mechatronics-Based Locomotion Module for Multi-Wheel Vehicle and Terrestrial Robot Applications / B. N. Belousov et al. // Commercial Vehicle Engineering Congress 2012. URL: <http://papers.sae.org/2012-01-1913> (дата обращения 13.08.2014).
7. Load Estimation of an Open-Link Locomotion Module for Robotic and Commercial Multi-Wheel Applications modes / B. N. Belousov et al. // Congress SAE. 2009. N. 4. P. 11—15.
8. ГОСТ 12.1.012—2004 Вибрационная безопасность. Общие требования
9. Смирнов Г. А. Многоосные многоприводные автомобили с автоматизированными системами // Автомобильная промышленность. 1997. № 9. С. 9—10.
10. Динамика системы "Дорога—шина—автомобиль—водитель". М.: Машиностроение, 1976. 554 с.
11. Брянский Ю. А. Управление большегрузных автомобилей. М.: Машиностроение, 1983. 176 с.
12. Иродов В. В. Исследование влияния эксплуатационных свойств (плавности хода, тормозных свойств, устойчивости и управляемости) на производительность автопоездов: дис. ... канд. техн. наук. М., 1982. 230 с.
13. Ревин А. А. Повышение эффективности, устойчивости и управляемости при торможении автотранспортных средств: дисс. ... докт. техн. наук: 05.05.03. Волгоград, 1983. 516 с.
14. Антонов Д. А. Теория устойчивости движения многоосных автомобилей. М.: Машиностроение, 1978. 216 с.
15. Фаробин Я. Е. Теория поворота транспортных машин. М.: Машиностроение, 1970. 176 с.
16. Andreev A. F., Kabanau V. I., Vantsevich V. V. Driveline Systems of Ground Vehicles. Abingdon: Theory and Design Scientific and Engineering Editor. Taylor & Francis Group/CRC Press, 2010. 792 p.
17. Gordaninejad F., Kelso S. P. Fail-Safe Magneto-Rheological Fluid Dampers for Off-Highway, High-Payload Vehicles // Journal of Intelligent Material System and Structures. 2000. Vol. 11, N. 5. P. 395—406.
18. Редько П. Г. Повышение безотказности и улучшение характеристик электрогидравлических следящих приводов. М.: Янус-К, 2002. 232 с.
19. Miller T. J. Switched Reluctance Motors and Their Control. Oxford: Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1993.
20. Navarro R. Performance of an Electro-Hydrostatic Actuator on the F-18 Systems Research Aircraft. California: NASA/TM-97-206224, Dryden Flight Research Center.
21. Абрамов Е. И., Колисниченко К. А., Маслов В. Т. Элементы гидропривода (Справочник). Киев: Техніка, 1969.
22. Белоусов Б. Н., Наумов С. В., Климачкова А. С. Электрогидравлический привод с объемным регулированием в составе системы рулевого управления транспортного средства // Актуальные вопросы машиноведения. Вып. 2: Сб. науч. тр. VI Белорусский конгресс по теоретической и прикладной механике. Минск, 2013. С. 88—91.
23. Гийон М. Исследование и расчет гидравлических систем. М.: Машиностроение, 1964. 385 с.

Mechatronics-Based Locomotion Module. Designing and Modeling Approach

B. N. Belousov, belousovbn@ya.ru, **T. I. Ksenevich**, taxen@mail.ru,
V. L. Stepnov, vlstepnov@yandex.ru, **A. S. Klimachkova**, wolff_al@mail.ru✉,
Scientific and production center "Special machinery" Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: **Klimachkova Anna S.**, Postgraduate Student,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation,
e-mail: wolff_al@mail.ru

Received on January 26, 2015

Accepted February 20, 2015

The main trend in designing of automobiles and mobile robots is a widespread use of mechatronic modules and systems. But there are many questions concerning the mechatronics-based approach. We see a constant integration of the theory and practice of an automobile and a mobile robot. Thus, research in these areas can be carried out simultaneously. The aim of the research is development of a designing approach of the mechatronics-based locomotion module for the automobiles and mobile robots. Mechatronics-based locomotion module is intended to control: (i) turning of the wheels of the axle, (ii) pressure in the chambers of the hydraulic cylinders of the axle suspensions and (in) vertical displacement of the left and right wheels of the axle. The task of the research is development of a complex mathematical model, which includes development of control algorithms for the all-wheel steering system and the regulated wheel springing system, choice of the control system components and of electro-hydraulic servo drive of wheels turning. On the basis of the mathematical model the authors studied all the components of the mechatronics-based locomotion module. All the obtained results of physical modeling were done with the use of a mechatronics-based locomotion module test bench. The article describes the study of electro-hydraulic servo drive with a centralized hydraulic system.

Keywords: mechatronics-based locomotion module, automobile, mobile robot, mathematical model, all-wheel steering system, test bench, electro-hydraulic servo drive

For citation:

Belousov B. N., Stepnov V. L., Ksenevich T. I., Klimachkova A. S. Mechatronics-Based Locomotion Module. Designing and Modeling Approach Control Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 7, pp. 484—490.

DOI: 10.17587/mau.16.484-490

References

1. **Poduraev Yu. V.** *Mekhatronika: osnovy, metody, primeneniye: ucheb. posobie dlya studentov vuzov* (Mechatronics: bases, methods, applications: study guide for students), Moscow, Mashinostroenie, 2006, 256 p. (in Russian).
2. **Belousov B. N., Popov S. D.** *Kolesnyye transportnyye sredstva osobo bol'shoi gruzopod'emnosti. Konstruktsiya. Teoriya. Raschet* (Heavy-duty wheeled vehicles: design, theory, calculations), Moscow, Publishing house BMSU named by Bauman, 2006, 728 p. (in Russian).
3. **Belousov B. N., Shukhman S. B.** *Prikladnaya mekhanika nazemnykh tyagovo-transportnykh sredstv s mekhatronnymi sistemami* (Applied mechanics land vehicles with mechatronics systems), Moscow, Agrokonsalt, 2013, 612 p. (in Russian).
4. **Belousov B. N., Boldorev A. G., Naumov S. V., Fedotov I. V.** *Model' vzaimodeistviya upravlyaemykh sistem podressorivaniya koles i vsekolosnogo rulevogo upravleniya kak podsystem ikh aktivnoi* (Interaction of controlled systems of wheel springing and all-wheel steering as a subsystem of their active safety), *Avtomobil'naya Promyshlennost'*, 2007, no. 2, pp. 5—9 (in Russian).
5. **Belousov B. N., Shelomkov, S. A., Ksenevich, T. I., Kupreyanov A. A.** Experimental verification of mathematical model of interaction of the wheel with the support surface at non-stationary rolling modes, *Problems of Machine-Building and Reliability of Vehicles*, 2009, no. 5, pp. 111—115.
6. **Belousov B. N., Naumov S. V., Ksenevich T. I.** Autonomous Mechatronics-Based Locomotion Module for Multi-Wheel Vehicle and Terrestrial Robot Applications, *Commercial Vehicle Engineering Congress 2012*, available at: <http://papers.sae.org/2012-01-1913> (date of access: 13.08.2014)
7. **Belousov B. N., Naumov S. V., Ksenevich T. I., Vantsevich V. V.** Load Estimation of an Open-Link Locomotion Module for Robotic and Commercial Multi-Wheel Applications modes, *Songress SAE*, 2009, no. 4, pp. 11—15.
8. **GOST 12.1.012—2004** *Vibratsionnaya bezopasnost', Obshchie trebovaniya* (Vibrating safety. The general requirements) (in Russian).
9. **Smirnov G. A.** *Mnogoosnyye mnogoprivodnye avtomobili s avtomatizirovannymi sistemami* (Multiaxial multidrive automobiles with automation systems Mnogoosnyye), *Avtomobil'naya Promyshlennost'*, 1997, no. 9, pp. 9—10 (in Russian).
10. **Hachaturova A. A.** ed. *Dinamika sistemy "Doroga—shina—avtomobil"—voditel'"* (Dynamics of system "Road—tire—automobile—driver"), Moscow, Mashinostroenie, 1976, 554 p. (in Russian).
11. **Bryanskii Yu. A.** *Upravlyaemost' bol'shegruznykh avtomobilei* (Control of heavy vehicles), Moscow, Mashinostroenie, 1983, 176 p. (in Russian).
12. **Irodov V. V.** *Issledovanie vliyaniya ekspluatatsionnykh svoystv (plavnosti khoda, tormoznykh svoystv, ustoychivosti i upravlyaemosti) naproizvoditel'nost' avtopoezdov: dis. ... kand. tekhn. nauk* (Research of performance properties (smooth running, break properties, stability, control) influence on road train capacity: thesis. ... Ph. D.), Moscow, 1982, 230 p. (in Russian).
13. **Revin A. A.** *Povysheniye effektivnosti, ustoychivosti i upravlyaemosti pri tormozhenii avtotransportnykh sredstv: diss. ... dokt. tekhn. nauk: 05.05.03* (Increasing of efficiency, stability and control of vehicle while breaking: doctor thesis. ... full doctor). Volgograd, 1983, 516 p. (in Russian).
14. **Antonov D. A.** *Teoriya ustoychivosti dvizheniya mnogoosnykh avtomobilei* (Stability theory of multiaxial vehicles), Moscow, Mashinostroenie, 1978, 216 p.
15. **Farobin Ya. E.** *Teoriya povorota transportnykh mashin* (Theory of vehicle turning), Moscow, Mashinostroenie, 1970, 176 p. (in Russian).
16. **Andreev A. F., Kabanau V. I., Vantsevich V. V.** *Driveline Systems of Ground Vehicles: Theory and Design*. England: Taylor & Francis Group/CRC Press, 2010, 792 p.
17. **Gordaninejad F., Kelso S. P.** Fail-Safe Magneto-Rheological Fluid Dampers for Off-Highway, High-Payload Vehicles, *Journal of Intelligent Material System and Structures*, 2000, vol. 11, no. 5, pp. 395—406.
18. **Red'ko P. G.** *Povysheniye bezotkaznosti i uluchsheniye kharakteristik elektrogidravlicheskiikh sledyashchikh privodov* (Faultless increasing and improving operating characteristics of hydraulic servo drives), Moscow, Yanus-K, 2002, 232 p. (in Russian).
19. **Miller T. J.** *Switched Reluctance Motors and Their Control*, Oxford, Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1993.
20. **Navarro R.** Performance of an Electro-Hydrostatic Actuator on the F-18 Systems Research Aircraft, California, NASA/TM-97-206224, Dryden Flight Research Center.
21. **Abramov E. I., Kolisnechenko K. A., Maslov V. T.** *Elementy gidroprivoda (Spravochnik)* (Hydro drive elements (reference book)), Kiev, Tekhnika, 1969 (in Russian).
22. **Belousov B. N., Naumov S. V., Klimachkova A. S.** *Elektrogidravlicheskiy privod s ob'emnym regulirovaniem v sostave sistemy rulevogo upravleniya transportnogo sredstva* (Fluid power drive as a part of vehicle steering system), *Up-to date machinery issues: scientific papers VI Belorussian congress connected with applied and theoretical mechanics*, Minsk, 2013, pp. 88—91 (in Russian).
23. **Giion M.** *Issledovanie i raschet gidravlicheskiikh sistem* (Research and calculation of hydraulic systems), Moscow, Mashinostroenie, 1964, 385 p. (in Russian).

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

Брянский государственный технический университет,

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

Учебно-научный технологический институт Брянского государственного технического университета

Коррекция интегральных отклонений движения исполнительных механизмов промышленных роботов и многокоординатных станков

Разработаны методика построения математических моделей многосвязных исполнительных механизмов промышленных роботов и многокоординатных станков, учитывающих первичные отклонения размеров, формы и позиционирования звеньев этих механизмов, а также метод коррекции интегральных отклонений их движения, вызываемых первичными отклонениями.

Ключевые слова: первичные отклонения, интегральные отклонения, коррекция отклонений

Первичные отклонения размеров и формы

В промышленных роботах и многокоординатных станках исполнительные механизмы представляют собой многосвязные механические системы с последовательной кинематической структурой, звенья которых связываются между собой шарнирами пятого класса и моделируются твердыми телами (рис. 1).

При изготовлении и сборке деталей и узлов, составляющих звенья многосвязных механических систем, неизбежны отклонения их геометрических размеров и формы, которые принято называть первичными. Наличие первичных геометрических отклонений приводит к отличию параметров движения реального механизма от параметров движения его идеальной модели, построенной на основе конструкторской документации (3D-модели) [1]. В целях повышения точности управления движением реального механизма необходимо выполнить коррекцию его идеальной модели с учетом измерения первичных геометрических отклонений звеньев этого механизма.

Первичные геометрические отклонения звеньев в математических моделях многосвязных механических систем можно учесть при описании преобразований координат между связываемыми с каждым звеном системами координат.

При использовании двух систем координат S_i и S_{i^*} , $i = 1..n$, связываемых с центрами шарниров каждого звена (рис. 2), первичные отклонения геометрических размеров звеньев многосвязных механических систем могут быть учтены введением линейных отклонений по соответствующим осям координат: $\delta_x^{(i)}$, $\delta_y^{(i)}$, $\delta_z^{(i)}$ (рис. 3), а первичные отклонения формы звеньев — введением угловых отклонений между соответствующими осями координат: $\alpha_{xx}^{(i)}$, $\alpha_{xy}^{(i)}$, $\alpha_{xz}^{(i)}$, $\alpha_{yx}^{(i)}$, $\alpha_{yy}^{(i)}$, $\alpha_{yz}^{(i)}$, $\alpha_{zx}^{(i)}$, $\alpha_{zy}^{(i)}$, $\alpha_{zz}^{(i)}$ (рис. 4).

Введенные линейные отклонения отражают отклонения геометрических размеров звеньев, при-

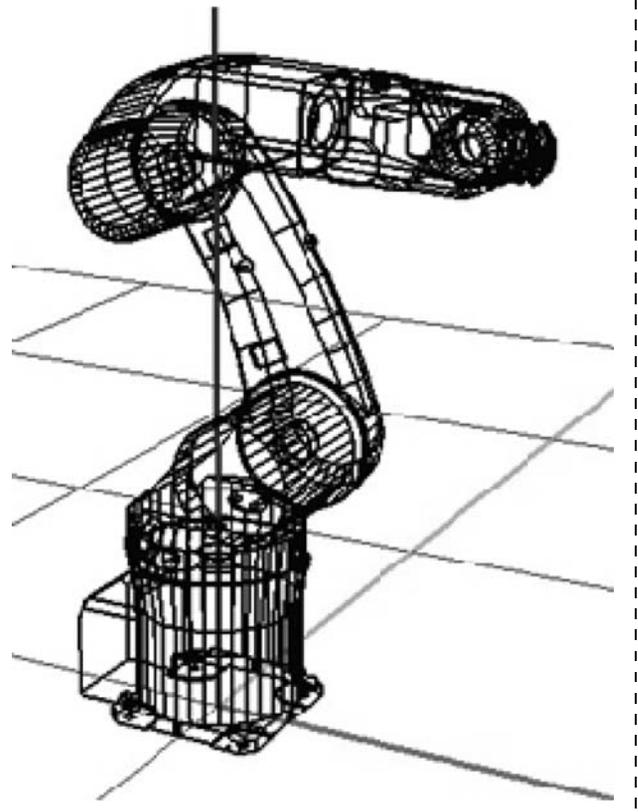


Рис. 1. Кинематическая структура промышленного робота

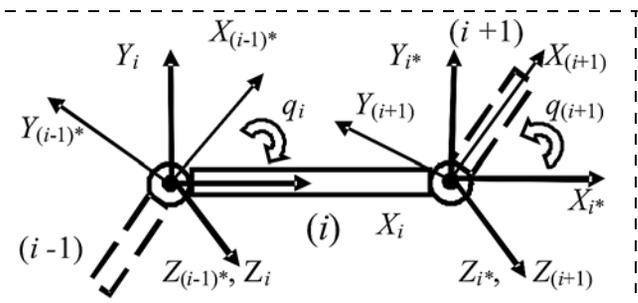


Рис. 2. Связываемые системы координат $S_i(X_i, Y_i, Z_i)$ и $S_{i^*}(X_{i^*}, Y_{i^*}, Z_{i^*})$

водящие к смещению центров шарниров. Так, $\delta_x^{(i)}$ определяет в системе координат S_i смещение по оси X_i начала системы координат S_{i^*} , аналогично, $\delta_y^{(i)}$ и $\delta_z^{(i)}$ определяют соответствующие смещения по осям Y_i и Z_i .

Угловые отклонения отражают отклонения формы звеньев и влияние перекосов и зазоров, имеющих внутри шарниров. К отклонениям от теоретической геометрической формы относятся, например, отклонения от плоскостности, прямолинейности, биение цилиндрической поверхности, отклонения профиля резьбы или зубьев. Эти отклонения влияют на относительные направления осей систем координат $S_i(X_i, Y_i, Z_i)$ и $S_{i^*}(X_{i^*}, Y_{i^*}, Z_{i^*})$, связанных со звеном. Так, $\alpha_{xx}^{(i)}$ определяет угловое отклонение оси X_{i^*} относительно оси X_i , $\alpha_{xy}^{(i)}$ — угловое откло-

нение оси X_{i^*} относительно оси Y_i . Аналогично определяются и другие угловые отклонения.

С учетом первичных отклонений звеньев матрица A_{i,i^*} , отражающая преобразование однородных координат из системы S_{i^*} в систему S_i , совмещающая поворот и параллельный перенос, будет иметь вид [2]

$$\tilde{A}_{i,i^*} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_{xx}^{(i)}) & \cos(\alpha_{xy}^{(i)}) & \cos(\alpha_{xz}^{(i)}) & l_x^{(i)} + \delta_x^{(i)} \\ \cos(\alpha_{yx}^{(i)}) & \cos(\alpha_{yy}^{(i)}) & \cos(\alpha_{yz}^{(i)}) & l_y^{(i)} + \delta_y^{(i)} \\ \cos(\alpha_{zx}^{(i)}) & \cos(\alpha_{zy}^{(i)}) & \cos(\alpha_{zz}^{(i)}) & l_z^{(i)} + \delta_z^{(i)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{M}_i & \tilde{L}_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Знак волны над матрицами в выражении (1) означает, что матрицы скорректированы с учетом первичных геометрических отклонений.

При составлении матриц A_{i,i^*} необязательно предварительно определять все девять угловых отклонений непосредственным их измерением (прямое измерение). Достаточно определить три из них, например два угла, образованные осью X_{i^*} с осями X_i и Y_i , и угол, образованный Z_{i^*} с осью Z_i . Остальные шесть угловых отклонений могут быть вычислены решением системы шести нелинейных уравнений (косвенное измерение), отражающих ортонормированность векторов, составляющих как столбцы, так и строки матрицы (3×3) \tilde{M}_i .

Отклонения позиционирования

Помимо первичных отклонений звеньев, связанных в основном с отклонениями их геометрических размеров и формы, существенное влияние на точность многозвенных механических систем оказывают отклонения позиционирования.

Отклонения позиционирования связаны с отклонениями обобщенных координат, называемых иногда шарнирными координатами. Так, в многозвенных механических системах, отражающих структуру исполнительных механизмов манипуляционных роботов и многокоординатных станков, звенья последовательно соединяются друг с другом шарнирами, имеющими одну степень свободы, образуя кинематические пары пятого класса. В таких механических системах отклонения позиционирования могут быть представлены как некоторые приращения их обобщенных координат: $q_{ид} = q_{ип} + \Delta q_i$, где $q_{ид}$ — действительное значение i -й обобщенной координаты; $q_{ип}$ — программное (заданное) значение i -й обобщенной координаты, которое в дальнейшем будем обозначать q_i (без символа "п"); Δq_i — ошибка позиционирования по i -й обобщенной координате (рис. 5).

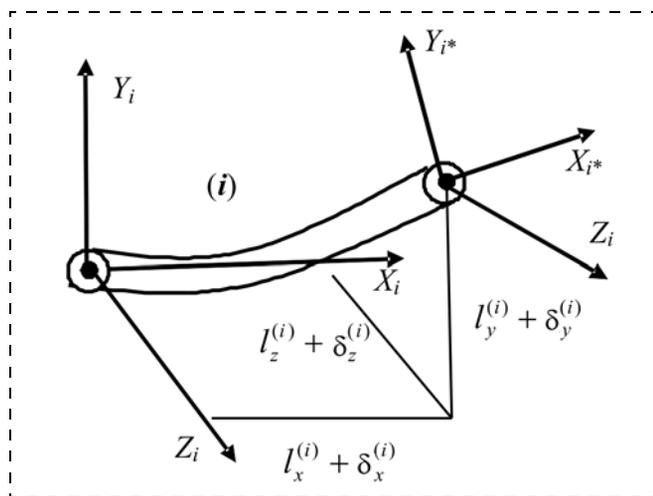


Рис. 3. Первичные отклонения звена

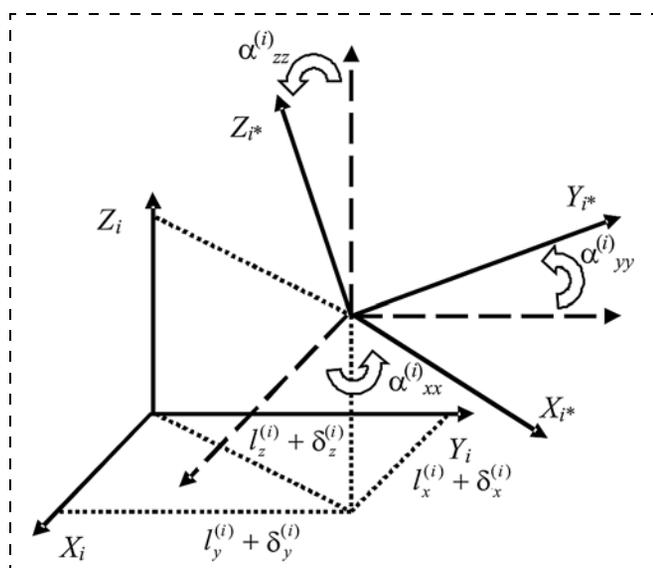


Рис. 4. Угловые отклонения

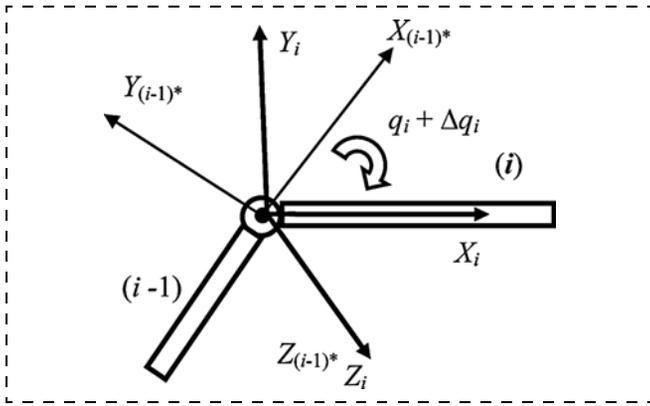


Рис. 5. Отклонение позиционирования по i -й обобщенной координате

С учетом отклонения (ошибки) позиционирования матрица преобразования однородных координат $A_{(i-1)*,i}$, определяющая положение системы координат S_i относительно системы $S_{(i-1)*}$, будет иметь вид

$$\tilde{A}_{(i-1)*,i} = \begin{bmatrix} \cos(\beta_i(q_i + \Delta q_i)) & -\sin(\beta_i(q_i + \Delta q_i)) & 0 & 0 \\ \sin(\beta_i(q_i + \Delta q_i)) & \cos(\beta_i(q_i + \Delta q_i)) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & (1 - \beta_i)(q_i + \Delta q_i) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где

$$\beta_i = \begin{cases} 1, & \text{если кинематическая пара вращательная;} \\ 0 & \text{— если поступательная.} \end{cases}$$

Отклонения позиционирования могут иметь различную природу. Ощутимый вклад в эти отклонения вносят зазоры в передаточных механизмах, а также упругая податливость некоторых элементов этих механизмов.

Матрица $A_{(i-1),i}$, определяющая относительное положение двух соседних звеньев, может быть представлена произведением матриц:

$$A_{(i-1),i} = A_{(i-1),(i-1)*} A_{(i-1)*,i} \quad (3)$$

Матрица преобразования однородных координат из системы S_k , связанной с k -м звеном, в неподвижную систему S_0 может быть определена как последовательность произведений матриц $A_{(i-1),i}$, $i = 1 \dots k$:

$$A_{0,k} = A_{0,1} A_{1,2} \dots A_{(i-1),i} A_{i,(i+1)} \dots A_{(k-1),k} = \prod_{i=1}^k A_{(i-1),i} \quad (4)$$

Матричные выражения (1)–(4) представляют собой математическую (геометрическую) модель манипуляционных систем, параметризованную на основе первичных геометрических отклонений их звеньев и отклонений позиционирования, возникающих в шарнирах. Эти отклонения определяются на конкретном образце путем проведения измерений современными метрологическими методами.

Определение первичных отклонений

Определение первичных отклонений звеньев рассмотрим на примере пятикоординатного обрабатывающего центра МС-300 (рис. 6). Из представленной на рис. 7 структуры видно, что исполнительный механизм станка МС-300 состоит из двух согласованно работающих многозвенных механизмов. Один механизм, обеспечивающий перемещение шпинделя по линейным координатам q_1, q_2 и q_3 , состоит из трех звеньев: 1 — салазки; 2 — стойка; 3 — шпиндель. Второй механизм, обеспечивающий поворот стола по угловым координатам q_4 и q_5 , состоит из двух звеньев: 4 — корпус планшайбы; 5 — планшайба.

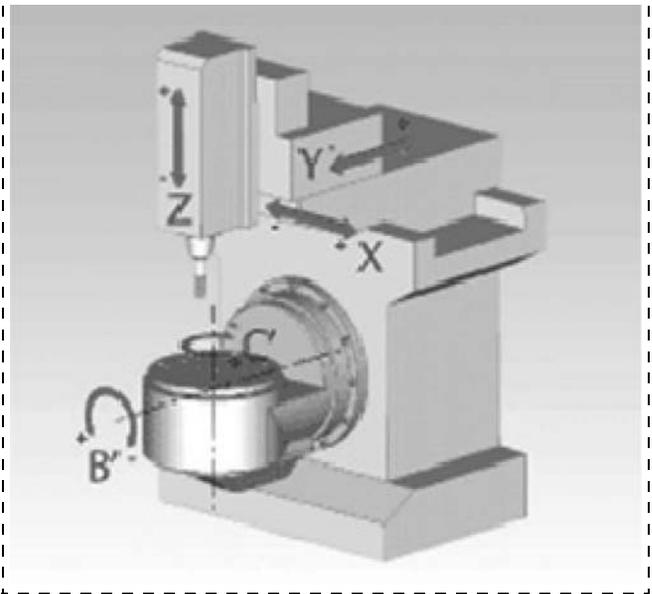


Рис. 6. Кинематическая структура станка МС-300

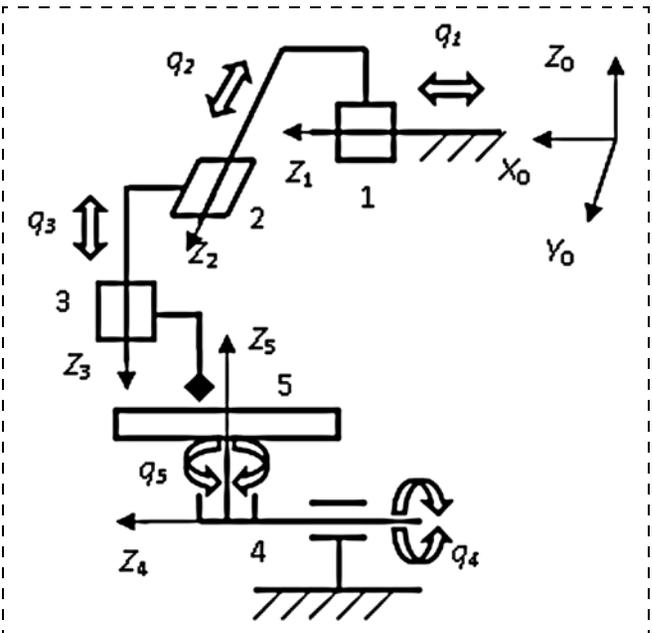


Рис. 7. Структурная схема

Набор первичных отклонений для двух многозвенных механических систем станка МС-300 состоит из тридцати первичных отклонений размеров и формы звеньев и пяти отклонений позиционирования:

- $\alpha_{xx}^{(1)}, \alpha_{xy}^{(1)}, \alpha_{xz}^{(1)}, \alpha_{xx}^{(2)}, \alpha_{xy}^{(2)}, \alpha_{xz}^{(2)}, \alpha_{xx}^{(3)}, \alpha_{xy}^{(3)}, \alpha_{xz}^{(3)}$ — отклонения углового положения узлов станка при движении по линейным координатам механизма перемещения шпинделя (постоянство углового положения);
- $\delta_x^{(1)}, \delta_y^{(1)}, \delta_x^{(2)}, \delta_y^{(2)}, \delta_x^{(3)}, \delta_y^{(3)}$ — отклонения от прямолинейности движения вдоль осей $Z_i, i = 1, 2, 3$;
- $\delta_z^{(1)}, \delta_z^{(2)}, \delta_z^{(3)}$ — отклонения геометрических размеров (длины) звеньев механизма перемещения шпинделя;
- $\alpha_{xz}^{(4)}, \alpha_{yz}^{(4)}, \alpha_{zz}^{(4)}, \alpha_{xz}^{(5)}, \alpha_{yz}^{(5)}, \alpha_{zz}^{(5)}$ — отклонения от параллельности и перпендикулярности осей поворотного стола (постоянство углового положения);
- $\delta_x^{(4)}, \delta_y^{(4)}, \delta_x^{(5)}, \delta_y^{(5)}$ — радиальные биения поворотного стола;
- $\delta_z^{(4)}, \delta_z^{(5)}$ — аксиальные биения поворотного стола;
- $\Delta q_1, \Delta q_2, \Delta q_3, \Delta q_4, \Delta q_5$ — отклонения позиционирования по линейным и угловым координатам.

Приведенные первичные отклонения двух многозвенных механических систем станка необходимо дополнить шестью первичными отклонениями станины станка, связанными с ее изготовлением и износом:

- $\alpha_{xz}^{(0)}, \alpha_{yz}^{(0)}, \alpha_{zz}^{(0)}$ — отклонения от параллельности и перпендикулярности направляющих станины (постоянство углового положения);
- $\delta_x^{(0)}, \delta_y^{(0)}, \delta_z^{(0)}$ — отклонения геометрических размеров.

Указанные первичные геометрические отклонения могут быть определены современными метрологическими методами.

Интегральные отклонения

Предложенные математические модели (1)–(4), учитывающие первичные отклонения геометрических параметров звеньев в многозвенных механических системах с последовательной структурой, могут быть использованы для определения интегральных отклонений положения звеньев, возникающих из-за накопления ошибок положения каждого предыдущего звена кинематической цепи. Под интегральными отклонениями многозвенных механических систем следует понимать отклонения траекторий движения характерных точек их звеньев и отклонения ориентации звеньев от заданной, вызванные наличием первичных геометрических отклонений и отклонений позиционирования, определенных ранее.

Положение любой точки в пространстве можно определить радиус-вектором этой точки в неподвижной системе координат. В многозвенных механических системах, имеющих последовательную структуру, радиус-вектор r точки начала системы координат S_n конечного звена в неподвижной системе координат S_0 (рис. 8) может быть задан выражением

$$r = A_{0,n} r_o, \quad r_o = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T.$$

С учетом первичных геометрических отклонений интегральное отклонение траектории $\Delta r(q)$ можно задать выражением, представляющим разность между действительным положением, определяемым радиус-вектором \tilde{r} , и программным положением, определяемым радиус-вектором r :

$$\Delta r(q) = (\tilde{A}_{0,n} - A_{0,n}) r_o = \begin{Bmatrix} i_0^T (\tilde{A}_{0,n} - A_{0,n}) r_o \\ j_0^T (\tilde{A}_{0,n} - A_{0,n}) r_o \\ k_0^T (\tilde{A}_{0,n} - A_{0,n}) r_o \end{Bmatrix}, \quad (5)$$

$$i_0^T = [1 \ 0 \ 0 \ 0], \quad j_0^T = [0 \ 1 \ 0 \ 0], \quad k_0^T = [0 \ 0 \ 1 \ 0].$$

Аналогично может быть определено интегральное отклонение, связанное с ориентацией, задаваемое вектором $\Delta e(q)$:

$$\Delta e(q) = \begin{Bmatrix} i_0^T (\tilde{A}_{0,n} - A_{0,n}) j_n \\ j_0^T (\tilde{A}_{0,n} - A_{0,n}) k_n \\ k_0^T (\tilde{A}_{0,n} - A_{0,n}) k_n \end{Bmatrix}, \quad (6)$$

$$j_n = [0 \ 1 \ 0 \ 0]^T, \quad k_n = [0 \ 0 \ 1 \ 0]^T.$$

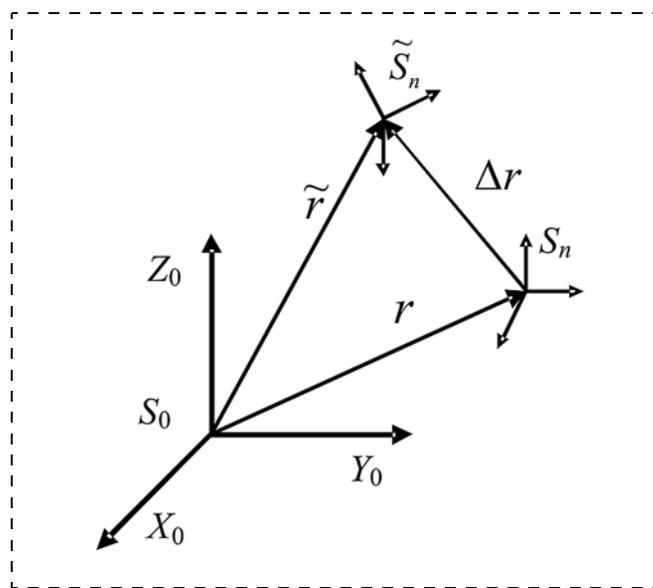


Рис. 8. Интегральное отклонение

Совместно интегральные отклонения положения могут быть определены комбинированным вектором $[\Delta r, \Delta e]^T$.

Таким образом, траектория движения рабочего органа реального промышленного робота будет отличаться от заданной программной траектории на вектор интегральных отклонений положения конечного звена (рис. 9). Следует иметь в виду, что законы движения промышленных роботов и многокоординатных станков в форме законов изменения обобщенных координат $q(t)$ их исполнительных механизмов разрабатываются для конкретных моделей этого оборудования. Поэтому возникает вопрос об использовании уже разработанных ранее программ управления движением различных моделей промышленных роботов или многокоординатных станков с возможностью компенсации интегральных отклонений движения конкретного образца, обусловленных его индивидуальными отклонениями геометрических размеров и формы.

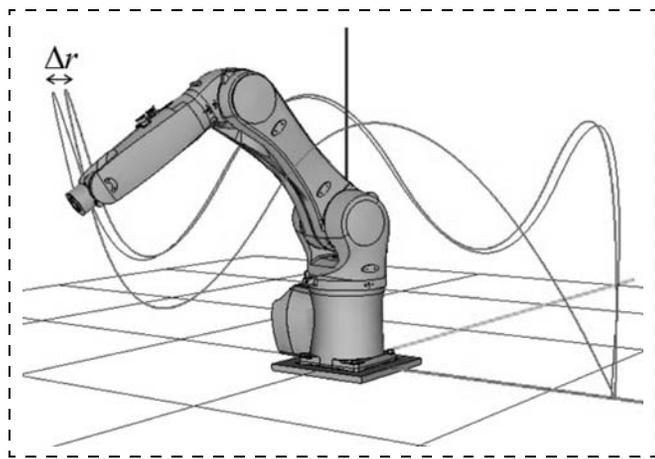


Рис. 9. Иллюстрация интегральных отклонений

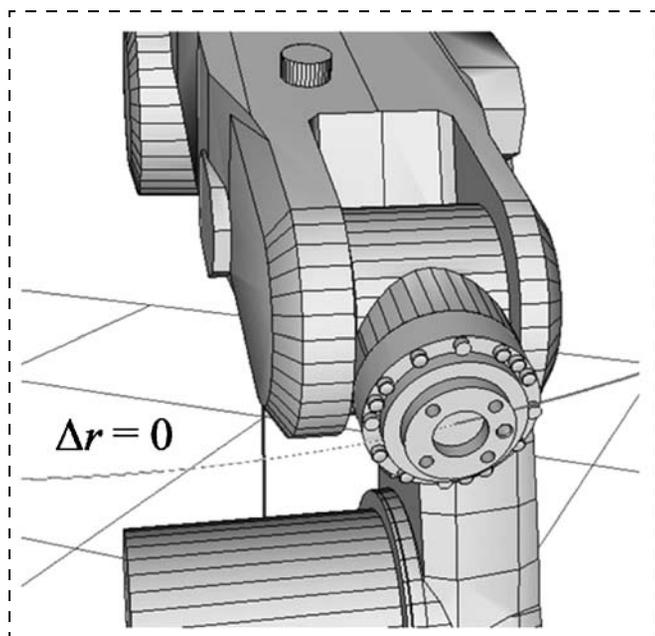


Рис. 10. Коррекция интегральных отклонений

Для получения законов движения исполнительных механизмов, соответствующих конкретным образцам оборудования, предложен метод коррекции интегральных отклонений движения исполнительных механизмов промышленных роботов и многокоординатных станков. Метод основывается на разработанных математических моделях (1)–(4). Использование идеальных $A_{0,k}$ и скорректированных $\tilde{A}_{0,k}$ геометрических моделей в выражениях (5) и (6) позволяет записать условие компенсации интегральных отклонений в форме

$$\begin{cases} \Delta r(q) \\ \Delta e(q) \end{cases} = 0 \rightarrow \tilde{q}. \quad (7)$$

Решение системы нелинейных уравнений (7) дает необходимые законы движения исполнительного механизма конкретного образца промышленного робота или многокоординатного станка, обеспечивающие его движение по заданной программной траектории (рис. 10). Использование математического обеспечения, реализующего данный метод коррекции, в системах автоматического управления промышленных роботов и многокоординатных станков позволит повысить их кинематическую точность. Близкие по данной теме вопросы рассмотрены в работах [3–11].

Список литературы

1. Бруевич Н. Г. Точность механизмов. М.; Л.: Гостехиздат, 1946. 332 с.
2. Крахмалев О. Н. Математическое моделирование динамики манипуляционных систем промышленных роботов и кранов-манипуляторов. Брянск: БГТУ, 2012. 200 с.
3. Крахмалев О. Н. Первичные отклонения геометрических параметров многосвязных механических систем промышленных роботов и станков с ЧПУ // Вестник Брянского государственного технического университета. 2014. № 4. С. 52–57.
4. Крахмалев О. Н. Исследование малых отклонений от программных движений манипуляционных систем с упругой податливостью, сосредоточенной в сочленениях звеньев // Вестник Брянского государственного технического университета. 2011. № 4. С. 39–46.
5. Крахмалев О. Н., Блейшмидт Л. И. Определение динамической точности манипуляционных систем роботов с упругими шарнирами // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 1. С. 29–36.
6. Серков Н. А. Основные направления повышения точности металлорежущих станков // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2010. № 2. С. 26–35.
7. Серков Н. А. Модель отклонения взаимного положения исполнительных органов многокоординатного станка // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011. № 3. С. 68–78.
8. Серков Н. А., Никуличев И. В. Методы и средства измерения первичных отклонений звеньев механизмов несущей системы многокоординатных станков с ЧПУ // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2012. № 2. С. 43–51.
9. Серков Н. А. Методы и средства измерения интегрального отклонения взаимного положения рабочих органов многокоординатных станков с ЧПУ // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2012. № 4. С. 112–124.
10. Moriwaki T. Multi-functional machine tool // CIRP Annals — Manufacturing Technology. 2008. № 57. P. 736–749.
11. Schwenke H., Knapp W., Haitjema H., Weckenmann A., Schmitt R., Delbressine F. Geometric error measurement and compensation of machines — An update // CIRP Annals — Manufacturing Technology. 2008. № 57. P. 660–675.

Correction of Integrated Motion Deviations of Industrial Robots and Multi-Axis Machine Tools

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

Corresponding author: **Krakhmalev Oleg N.**, Ph. D. Associate Professor,
Bryansk State Technical University, Bryansk, 241035, Russian Federation,
e-mail: olegkr64@mail.ru

Received on March 13, 2015

Accepted March 31, 2015

A method was developed for construction of mathematical models, which describe the geometry of the industrial robots and multi-axis machine tools. This method takes into account the primary deviations in size, shape and location. Primary deviations occur during manufacture of the industrial robots and multi-axis machine tools. Such deviations can be measured. For this purpose modern metrology methods may be used. A method was developed for correction of the integrated deviations in the industrial robots and multi-axis machine tools. The method allows us to offset the effect of the primary geometric deviations. The method ensures a coincidence of the trajectories of real industrial robots and multi-axis machine tools and their ideal models. The task is reduced to solving of a system of nonlinear equations. For this purpose modern numerical methods may be applied. These methods can improve the accuracy control of the industrial robots and multi-axis machine tools. Determination of the primary deviations is presented on the example of a five-axis machine tool. On the basis of a kinematic scheme of a machine tool, the following deviations were revealed. Deviation of the angular position of the spindle machine tool during its movement. Deviation from the straightness of motion along the specified axes. Deviation of the lengths of the links of the movement mechanism of the spindle. Deviations from the parallelism and perpendicularity to the axes of the turntable. Radial run out of the turntable. Axial runout of the turntable. Deviations in positioning by the linear and angular coordinates. Deviations from the parallelism and perpendicularity to the frame guides. References are made to the works of the other researchers.

Keywords: primary deviations; integrated deviations, correction of deviations

For citation:

Krakhmalev O. N., Petreshin D. I. Correction of Integrated Motion Deviations of Industrial Robots and Multi-Axis Machine Tools, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 7, pp. 491–496.

DOI: 10.17587/mau.16.491-496

References

1. **Bruevich N. G.** *Tochnost' mekhanizmov* (The accuracy of the machinery). Moscow, Leningrad, Gostekhizdat, 1946, 332 p. (in Russian).
2. **Krakhmalev O. N.** *Matematicheskoe modelirovanie dinamiki manipulyatsionnykh sistem promyshlennykh robotov i kranov-manipulyatorov* (Mathematical modeling of dynamics of manipulation systems industrial robots and truck mounted cranes), Bryansk, published by BGTU, 2012, 200 p. (in Russian).
3. **Krakhmalev O. N.** *Pervichnye otkloneniya geometricheskikh parametrov mnogozvennykh mekhanicheskikh sistem promyshlennykh robotov i stankov s ChPU* (Primary deviations geometrical parameters multilink mechanical systems industrial robots and CNC machine tools), *Vestnik Bryanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*, 2014, no. 4, pp. 52–57 (in Russian).
4. **Krakhmalev O. N.** *Issledovanie malykh otklonenii ot programmnykh dvizhenii manipulyatsionnykh sistem s uprugoi podatlivost'yu, sosredotochennoi v sochleneniyakh zven'ev* (Study of small deviations from the program motions of manipulation systems with elastic compliance, concentrated in the hinges links.), *Vestnik Bryanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*, 2011, no. 4, pp. 39–46 (in Russian).
5. **Krakhmalev O. N., Bleishmidt L. I.** *Opredelenie dinamicheskoi tochnosti manipulyatsionnykh sistem robotov s uprugimi sharnirami* (Determination of Dynamic Accuracy of Manipulation Systems of Robots with Elastic Hinges), *Problemy Mashinostroeniya i Nadezhnosti Mashin*, 2014, no. 1, pp. 29–36 (in Russian).
6. **Serkov N. A.** *Osnovnye napravleniya povysheniya tochnosti metallovezhushchikh stankov* (Trends accuracy improvement of machine tools, Problems of mechanical engineering and automation), *Problemy Mashinostroeniya i Avtomatizatsii*, 2010, no. 2, pp. 26–35 (in Russian).
7. **Serkov N. A.** *Model' otkloneniya vzaimnogo polozheniya ispolnitel'nykh organov mnogokoordinatnogo stanka* (Model deviation of the relative position of the executive bodies of multiaxis machine tool), *Problemy Mashinostroeniya i Nadezhnosti Mashin*, 2011, no. 3, pp. 68–78 (in Russian).
8. **Serkov N. A., Nikulichev I. V.** *Metody i sredstva izmereniya pervichnykh otklonenii zven'ev mekhanizmov nesushchei sistema mnogokoordinatnykh stankov s ChPU* (Methods measurement and tools of primary deviations for carrying system's mechanisms of multicoordinate CNC machine tools), *Problemy Mashinostroeniya i Avtomatizatsii*, 2012, no. 2, pp. 43–51 (in Russian).
9. **Serkov N. A.** *Metody i sredstva izmereniya integral'nogo otkloneniya vzaimnogo polozheniya rabochikh organov mnogokoordinatnykh stankov s ChPU* (Methods and measurement tools of relative position of the executive bodies of multiaxis CNC machine tools), *Problemy Mashinostroeniya i Avtomatizatsii*, 2012, no. 4, pp. 112–124 (in Russian).
10. **Moriwaki T.** Multifunctional machine tool, *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 2008, no. 57, pp. 736–749.
11. **Schwenke H., Knapp W., Haitjema H., Weckenmann A., Schmitt R., Delbressine F.** Geometric error measurement and compensation of machines — An update, *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 2008, no. 57, pp. 660–675.

George Rzevski, д-р техн. наук, проф., rzevski@gmail.com,

The Open University, Milton Keynes, UK,

Bjorn Madsen, директор по международным продажам, bm@multiagenttechnology.com,

Multi-Agent Technology Ltd, London, UK,

П. О. Скобелев, д-р техн. наук, проф., petr.skobelev@gmail.com,

А. В. Царев, руководитель направления, tsarev@smartsolutions-123.ru,

НПК "Разумные решения"

Управление цепочками поставок с использованием мультиагентных технологий

Описывается новый подход к управлению цепочками поставок на основе мультиагентных технологий и онтологий, позволяющий справиться с возрастающей сложностью задач планирования в условиях быстро меняющейся конъюнктуры рынка, колебаний спроса и предложения, различных сбоев и непредвиденных событий в цепях поставок. Предлагается метод виртуального "круглого" стола для поддержки принятия решений при планировании цепочек поставок, а также метод адаптивного динамического планирования расписаний поставок по событиям, основанный на мультиагентной технологии с использованием онтологии. Разработана концепция виртуального "круглого" стола и регламент согласования решений на всех этапах цепи поставок продукции с включением в этот процесс всех заинтересованных участников. Выделены основные компоненты клиент-серверной архитектуры мультиагентной системы управления цепочками поставок. Обосновано решение использовать онтологии для описания концептуальных знаний, необходимых для управления цепочками поставок. Разработанные модели и методы планирования по отдельным заказам и по прогнозу спроса на любой горизонт и с любой детализацией обеспечивают адаптивное динамическое планирование поставок в реальном времени. Проведенные исследования и моделирование показывают, что переход к планированию и управлению в реальном времени позволит повысить прибыль компании за счет более быстрой адаптации к изменяющимся условиям.

Ключевые слова: цепочки поставок, мультиагентная технология, онтология, реальное время, виртуальный "круглый" стол, адаптивность, планирование

Введение

Управление цепочками поставок (закупки, формирование запасов, перераспределение товара в сети, маршруты доставки, удовлетворение спроса и обеспечение ассортимента) востребовано в широком спектре отраслей (химическая промышленность, автомобилестроение, производство детских игрушек, продуктов питания и т. д.) и среди компаний разного масштаба (от отдельных магазинов до интернациональных корпораций). Планирование работы цепочки поставок на определенный горизонт является ключевым элементом как оперативного управления, так и моделирования различных вариантов стратегического развития сети поставок [1, 2].

Сложность цепочек поставок постоянно растет, любой расчет плана работы сети требует значительных вычислительных ресурсов и занимает много времени [3]. Современные цепочки поставок описываются моделями большой размерности (номенклатура товаров может составлять десятки тысяч, материалов — сотни и тысячи, центров хранения и дистрибуции — десятки и т. д., поэтому обычно в системе > 100 переменных), при этом адекватность "упрощенных" решений часто вызывает сомнения

у пользователей. Кроме того, быстро меняющаяся конъюнктура рынка, колебания спроса и предложения, неточности прогноза спроса, влияние погодных условий на транспортные коммуникации и другие внешние условия, воздействующие на потоки данных в моделях разных частей системы, приводят к неконсистентности создаваемых планов поставок. Дополнительную неопределенность вносят различные сбои в цепях поставок — отказы поставщиков, недоступность данного ресурса в определенный момент времени и т. д. Неустойчивость распространяется по всей цепочке и приводит, например, к хорошо известному "эффекту хлыста", связанному с быстрым накоплением излишних товаров и материалов на складах.

Традиционные централизованные системы управления цепочками поставок перестают справляться с современными задачами планирования. Во многом это связано с тем, что применяемые в них алгоритмы планирования, основанные на методах математического линейного и динамического программирования, дискретной и смешанной оптимизации, плохо поддаются модификации и развитию вслед за развитием бизнеса, появлением новых факторов, которые нужно учитывать [4]. Нередко

используемая на предприятии система оптимизации оказывается непригодна для эксплуатации при внедрении новых бизнес-процессов (например, на предприятии переходят от ежедневного планирования к планированию по часам или вводят небольшой производственный процесс (к примеру, комплектация в точке продажи), который не учитывался при написании оптимизирующего модуля). Поскольку исторически оптимизирующие модули разрабатывались без учета необходимости модификации, их часто приходится переписывать с нуля. Традиционно применяемые методы (например, симплекс-метод) являются централизованными по сути, поэтому их конкретная реализация под определенную постановку задачи получается очень специфической. Кроме того, такие алгоритмы ориентированы на пакетную обработку и полностью строят расписание заново при появлении даже небольших изменений во входных данных (событиях).

Одним из подходов к преодолению указанных проблем является построение распределенных мультиагентных систем, базирующихся на фундаментальных принципах самоорганизации и эволюции, присущих живой природе. В системах, созданных на основе такого подхода, решение достигается за счет сущностей с собственной логикой и целями (агентов), взаимодействующих между собой согласно унифицированным правилам. Агенты поставщиков материалов, производства (фабрик), транспорта (грузовых компаний), центров хранения и переработки, а также утилизации товаров действуют согласованно и координированно, способны к адаптивной обработке событий [5, 6]. Сеть агентов может постоянно расширяться за счет добавления в нее новых членов.

В данной статье рассматривается опыт создания прототипа системы управления, построенной с применением мультиагентных технологий и учитывающей указанные требования.

1. Применение мультиагентных технологий в управлении цепочками поставок

Современные торгово-производственные компании находятся в постоянно меняющихся внешних рыночных условиях, выпускают огромный ассортимент продукции, обладают широкими связями с предприятиями по закупке сырья, транспортными и финансовыми компаниями. При этом ассортимент продукции компании постоянно расширяется и модифицируется, не только отвечая изменяющимся потребностям пользователей, но и формируя эти потребности.

1.1. Задачи управления поставками

В этих условиях одной из важнейших задач управления компанией становится согласованное гибкое планирование производства и продажи продукции, основанное на прогнозах сбыта и складывающейся ситуации в производстве [7]. Если за-

пускается мощная реклама нового продукта на телевидении, фабрики к заданному сроку должны не только произвести данный товар в нужном объеме, но и довести его до оптовых потребителей и в конечном счете до полок в магазинах. Иначе рекламная кампания может оказаться малоэффективной, не достигнет ожидаемых результатов или просто не окупит затрат. В свою очередь, чтобы действовать согласованно, как единый организм со всей компанией и подразделениями по сбыту, фабрики должны заранее позаботиться о получении нужных компонентов для производства этой новой или уже потребляемой рынком продукции, наладке оборудования для запуска нового продукта в серию, доставке продукции в срок, обучении персонала и т. д.

Такая согласованность в действиях предполагает необходимость своевременного выявления и разрешения конфликтов между подразделениями по рекламе, производству и продаже продукции, а также другими подразделениями компании в реальном времени. Действительно, если подразделение по сбыту продукции планирует запуск новых рекламных кампаний, производители и транспорт должны обеспечить к нужному сроку доводку продукции до прилавка в требуемых объемах. Вместе с тем если сбыт неожиданно оказался больше или меньше запланированного, нужна соответствующая корректировка рекламной кампании. Наличие такого рода постоянных конфликтов между подразделениями по производству и продаже продукции, имеющими собственные интересы, предпочтения и ограничения, отражает естественный порядок поддержки принятия и согласования решений в процессе жизнедеятельности любой компании такого рода. В свою очередь, признание положительной роли конфликтов предполагает наличие соответствующих бизнес-процессов и программных средств для поддержки многосторонней активности по их разрешению, в которой стороны взаимодействуют как равные участники, каждый из которых может инициировать согласованные изменения в планах в любой момент времени.

Следует учитывать, что для компании крупного масштаба речь идет о координации деятельности десятков тысяч работников, взаимодействующих с миллионами потребителей, и о значительных финансовых ресурсах. Цена ошибки в принятии решений, например, простая несогласованность или ошибка в планировании на несколько дней, может приводить к значительным финансовым потерям, резкому возрастанию рисков, неудовлетворенности покупателей и ряду других серьезных последствий.

В то же время существующий в настоящее время бизнес-процесс работы рассматриваемых подразделений компаний предусматривает весьма "прямолинейный" и "жесткий" порядок, который, к сожалению, поддерживается существующими средствами автоматизации бизнес-процессов, не позволяющими своевременно выявлять и согласованно разрешать конфликты между подразделениями в ин-

тересах всего предприятия в целом. Например, если фабрика запланировала производство некоторой продукции, то будет ее производить в течение двух недель, даже если это не требуется для потребителей уже в текущий момент.

В связи с этим целью создания рассматриваемой мультиагентной системы управления цепочками поставок является повышение качества и эффективности процессов управления компанией за счет внедрения механизмов гибкого планирования и согласованного взаимодействия всех участников жизненного цикла производства и продажи продукции компании.

1.2. Динамическое планирование цепочек поставок

Для решения поставленной задачи разрабатывается автоматизированная система поддержки согласованной деятельности по планированию производства, транспортировки и сбыта продукции, основой которой является динамический планировщик работ на основе мультиагентных технологий. Планировщик реализует новую технологию гибкого планирования и поддержки взаимодействия с исполнителями в основных подразделениях компании для согласования или пересмотра планов.

Функциональные возможности системы помогают менеджерам создавать планы производства и сбыта продукции, управлять процессом планирования работ для достижения наилучших результатов с заданными критериями, предпочтениями и ограничениями, адаптировать планы при возникновении непредвиденных событий, предлагать изменения в планах в расчете на улучшение важных показателей, согласовывать решения при возникновении важных событий, отслеживать результаты работы и контролировать основные показатели этого процесса, а также вырабатывать рекомендации для участников процесса по решению возникающих проблем.

Динамические планировщики, лежащие в основе подхода, способны не только изначально запланировать рассматриваемые процессы производства и сбыта продукции, но и постоянно корректировать эти планы по мере поступления новых событий в реальном масштабе времени [8—11]. При этом события вводятся любым из участников системы в каждом из подразделений, в том числе менеджерами производства или сбыта продукции, в соответствии с их ролями, полномочиями и правами в системе.

Введенные события порождают варианты изменения планов работ, которые оцениваются другими участниками данного процесса с учетом собственных критериев, предпочтений и ограничений, и далее согласовыва-

ются путем переговоров, в ходе которых возможны компромиссы и уступки сторон по выбранным критериям. При этом всем участникам наглядно демонстрируется, какие критерии согласовываются, и где нарушаются ограничения предпочтения. Например, возможно, что рост сбыта продукции одного наименования вынуждает отложить производство продукции другого наименования и т. п.

1.3. Принципы организации виртуального "круглого" стола для поддержки принятия решений при планировании цепочек поставок

Фактически, между пользователями основных подразделений предприятия организован постоянно действующий виртуальный "круглый стол" (рис. 1), в котором по определенному регламенту будут согласовываться решения по первоначальному планированию, последующему исполнению, а также изменению планов производства и сбыта продукции с включением в этот процесс всех заинтересованных участников.

Для создания виртуального "круглого стола" использованы мультиагентная технология и технология баз знаний (онтологий). В этом подходе все участники процесса получают своих программных агентов с индивидуальными критериями, расписаниями работ, предпочтениями и ограничениями, способными действовать от лица и по поручению своих владельцев. Агенты пользователей, соответствующие различным подразделениям компании и лицам, принимающим решения, могут взаимодействовать путем обмена сообщениями для выработки согласованных решений и достижения компромиссов в целях формирования сводного плана компании.

Результатом работы системы являются варианты сводного плана производства и сбыта продукции, удовлетворяющие заданным требованиям, сформированным на основе целей, предпочтений и ограничений всех участников процесса.

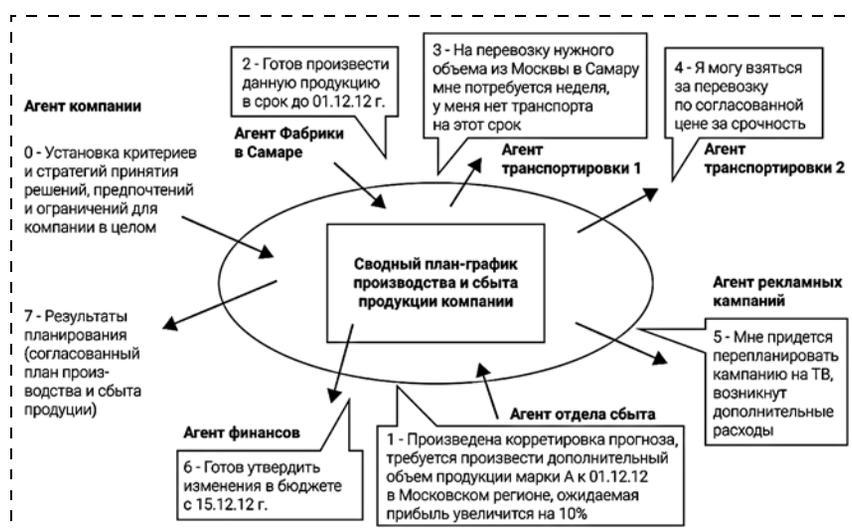


Рис. 1. Упрощенный пример взаимодействий в сети поставок для формирования и согласования планов производства и сбыта продукции

На рис. 1 показана цепочка взаимодействий агентов, вызванная событием ввода менеджером по сбыту задачи дополнительного производства продукции некоторого наименования, обусловленной расхождением между прогнозом и фактом исполнения плана продаж (шаг 1). В ответ на это событие активируется агент одной из фабрик (шаг 2), способных произвести данную продукцию. Фабрика предлагает встречный план производства, который далее согласовывается с транспортными компаниями (шаги 3 и 4). С учетом возникающей задержки требуется пересмотр объемов и сроков рекламной кампании, что частично увеличивает расходы (шаг 5), но с учетом ожидаемой дополнительной прибыли может быть утверждено агентом финансов (шаг 6) или отвергнуто в случае каких-либо других приоритетных расходов на данный период.

Взаимодействуя между собой, агенты различных подразделений могут договориться, какое решение наилучшим образом подходит для текущей ситуации (с учетом заданных предпочтений и ограничений) и сформировать согласованный сводный план производства и сбыта продукции. Если какие-то планы на каком-либо из шагов выходят за рамки важных ограничений, агенты могут вернуться на один или несколько шагов назад и пересмотреть принятые ранее решения, чтобы найти варианты сокращения сроков работ, расходов и т. д. Тогда каждый из агентов обращается к своей ситуации и ищет возможности для уступок, например, по сокращению сроков работ. Из найденных опций агенты коллективно выбирают решения, обладающие наибольшей ценностью как для каждого из участников, так и для компании в целом.

Рассмотренный пример регламента согласования решений является лишь одним из возможных вариантов организации процесса согласования и принятия многокритериальных решений в условиях общих ценностей подразделений компании.

Таким образом, предлагаемый подход основан на моделировании процессов переговоров участни-

ков проекта в соответствии с явно заданными целями, ролями, стратегиями, предпочтениями и ограничениями. При этом агенты, действующие от лица и в интересах своих владельцев, находят решения (возможно, компромиссные) в соответствии с заданными им установками. Если выполнить требуемые установки не удастся, агенты обращаются к своим владельцам с предложениями по их изменению.

В этом случае пользователь системы может воспользоваться специальным редактором логики согласования и принятия решений, открывающим доступ в базу знаний системы, где можно удобно задавать и гибко менять критерии, предпочтения и ограничения, соглашаясь на уступки по самим установкам.

Базы знаний, построенные как семантические сети (рис. 2), содержат классификаторы продукции, описания этапов процессов производства продукции, видов транспортных средств и т. д. В семантической сети выделяются концепты и отношения, к числу концептов могут быть отнесены как объекты, так и процессы, которые, в свою очередь, могут иметь атрибуты и т. д. На рис. 2 прямоугольниками выделены объекты и процессы, а стрелками — отношения различных типов ("Является классом", "Забронирован" и т. п.). Используя данные сведения, а фактически — модель бизнеса компании в части принятия решения по планированию и сбыту продукции, программные агенты могут анализировать ситуацию, планировать требуемые операции, отслеживать их исполнение и т. д.

Важным преимуществом баз знаний о предметной области является тот факт, что знания в значительной степени отделены от программного кода и могут пополняться менеджерами компании без перепрограммирования системы. Агенты, помогающие планировать или согласовывать работы, реализованы как универсальные компоненты для динамического планирования, по возможности не зависящие от особенностей и специфики рассматриваемой предметной области конкретной компании.

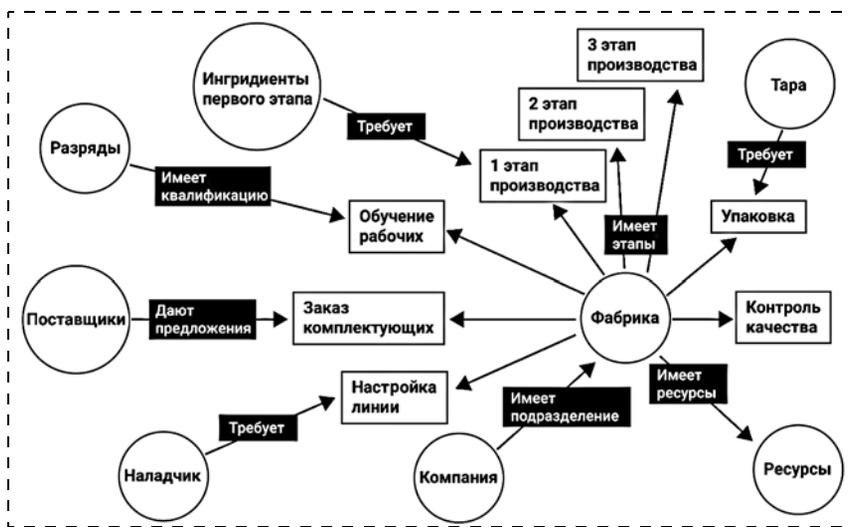


Рис. 2. Упрощенный фрагмент онтологии базы знаний о сети поставок

2. Архитектура и функциональные возможности мультиагентной системы управления цепочками поставок

Прототип системы управления цепочками поставок, реализованный в соответствии с изложенными выше принципами, включает следующие подсистемы:

1) мультиагентный модуль планирования, имеющий собственный API (программный интерфейс), который можно встраивать в уже существующие системы и, передавая на вход начальные данные и события, получать на выходе расписание сети или его изменения;

2) web-сервис, принимающий авторизуемые сетевые подключения пользователей, обеспечивающий хранение, фильтрацию и группировку данных, передаваемых между клиентами и модулем планирования, который встроен в него;

3) клиентское web-приложение, которое запускается в окне браузера и подключается к серверу через интернет (рис. 3).

В систему вносится описание сети, включая все фабрики, центры дистрибуции, склады, магазины, каналы доставки, ограничения по пропускной способности, производственные линии, реализуемую продукцию и используемые материалы, формулы расчета стоимости хранения, транспортировки, производства и многие другие параметры, если их нужно учитывать.

Затем в систему поступает информация о текущих остатках различной продукции на складах и прогнозы реализации во всех частях сети. Остатки, прогнозы (или отдельные заказы), цены, стоимости и другие параметры могут меняться в реальном времени, вызывая частичное перепланирование и адаптацию плана действий к изменившимся условиям. План содержит информацию о том, что, где и когда надо закупать, производить, транспортировать, хранить и реализовывать. Запланированные действия распространяются на тот горизонт в будущее, на который известен (задан) прогноз спроса.

Система планирует движение продукции в сети поставок таким образом, чтобы общая прибыль была как можно больше, обеспечивая при этом быструю реакцию на все изменения и, как следствие, постоянное наличие актуального плана действий, ориентированного на извлечение максимума из текущей и предполагаемой в будущем ситуации.

Функциональные возможности системы:

- планирование по отдельным заказам и по прогнозу спроса на любой горизонт и с любой детализацией (минуты, часы, дни, недели);
- учет пропускных способностей каналов и вместимости транспорта (грузовиков);
- учет доступного места для хранения продукции и материалов;
- гибкие модели учета стоимости транспортировки и хранения;
- ситуативный выбор наиболее эффективных каналов доставки (маршрутов в сети);
- планирование многостадийного производства с учетом потребности в материалах, оборудовании;
- учет контрактных обязательств по объемам поставок и производства;
- учет различных цен на продукцию в разных частях сети;
- формирование страховых запасов для управления уровнем сервиса;

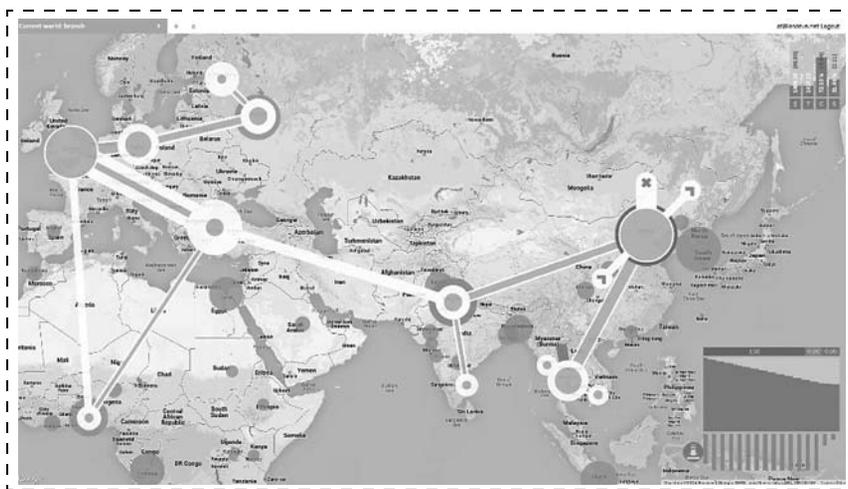


Рис. 3. Общий вид клиентского web-приложения

- управляемое планирование задержек заказов в условиях ограниченных возможностей сети;
- формирование предложений по изменению параметров сети;
- балансировка спектра реализуемой продукции, когда доставить все невозможно;
- консолидация грузов и минимизация стоимости доставки;
- учет графика доступности и рабочего времени отдельных узлов сети;
- учет длительности доставок и производства;
- учет карантина на продукцию.

Пользовательский интерфейс максимально интерактивен и нагляден (рис. 4, см. вторую сторону обложки). Управление сетью выполняется на карте, где видно расположение узлов сети, связывающие их каналы и основные параметры. Размеры узлов и каналов характеризуют их пропускную способность и значение потока продукции через них. Выделяя канал или узел (фабрику, склад, магазин), можно посмотреть детали (график поставок, прогноз спроса, график остатков, упущенные продажи) и поменять настройки (размер склада, канала, текущие остатки, прогноз на конкретный день). Финансовые показатели (прибыль, доход, расходы на доставку, хранение) и другие показатели (загрузка каналов, складов) представлены как для всей сети, так и для отдельных узлов.

Систему можно применять для управления в реальном времени, когда она в автоматическом режиме обрабатывает изменения (события) и показывает, что нужно изменить в работе, чтобы наиболее эффективно сработать в изменившейся ситуации. Например, в таком режиме появление нереализованного товара на складе одного из магазинов (продажи ниже, чем ожидалось), может сразу показать, что надо поменять порядок производства и график закупок материалов.

Кроме того, адаптивный характер обработки изменений позволяет использовать систему для интерактивного моделирования сетей, когда пользователь делает "слепок" текущей ситуации с реальными

остатками и прогнозами спроса и затем вносит изменения в конфигурацию сети (например, ввода новый центр дистрибуции, другие каналы, другую модель производства) или меняет параметры отдельных узлов и каналов. Система немедленно перепланирует потоки продукции под вносимые изменения и показывает прибыль или убыток от этих изменений.

Аналогично, используя "слепок" рабочей сети, можно проверять, как предполагаемые заказы повлияют на работу сети, и увидеть предполагаемую прибыль с учетом реалистичной ситуации.

В различных ситуациях (разные типы бизнеса) решаемые системой задачи могут фокусироваться на формировании графика поставок, на выборе наиболее эффективных каналов из доступных, на балансировке дефицитных ресурсов, на производстве или на других возможностях.

3. Экспериментальные исследования методов планирования цепочек поставок

Прототип мультиагентной системы управления цепочками поставок был протестирован на различных синтетических тестах и на реальных данных коммерческих компаний. Было также проведено сравнение с работой оптимизирующего алгоритма, решающего стандартную транспортную задачу.

Рассматривалась стандартная задача снабжения в сети, состоящей из M источников и N потребителей. Количество продукта, потребляемого каждым потребителем и поставляемого каждым источником, ограничено. Доставка по каждому из $M \cdot N$ каналов от источника потребителю имеет свою стоимость, линейно зависящую от размера поставки, такую, при которой доставка остается выгодной (цена реализации $>$ стоимости). Требуется определить, сколько продукта нужно доставить по каждому каналу, чтобы стоимость доставки его максимально возможного количества была минимальна (доставка в любом случае прибыльна).

Была проведена серия экспериментов, в которой число источников остается постоянным ($M = 50$), а число потребителей N изменяется от 50 до 300. Стоимости доставки по каналам, ограничения на поставку и потребление назначаются случайно. В каждом эксперименте, применяя симплекс-метод, находят худшее и лучшее решения и замеряется время вычисления.

Затем для каждого набора данных в серии решение находится с помощью разработанного модуля планирования двумя методами. При этом потребности задаются на всех сайтах-потребителях одновременно. Ограничения на поставку задаются в виде текущего значения остатка на складах сайтов-источников.

В первом методе стоимость доставки задается непосредственно в виде линейной функции стоимости доставки по каналу. При этом размер доставки не ограничивается. Во втором методе стоимость дос-

тавки задается в виде закупочной цены между соответствующими источником и потребителем.

Для каждого решения полученная сумма расходов на доставку нормируется относительно диапазона [худшее решение; лучшее решение], т. е. нормированное значение показывает качество решения транспортной задачи соответствующим методом.

Решение с использованием закупочных цен дает среднее качество 93 % (рис. 5). Решение с использованием стоимости канала "источник — потребитель" дает среднее качество 96 % (рис. 6).

Эксперимент показал, что время полного перепланирования с использованием динамического планировщика по сравнению с временем поиска решения симплекс-методом, оптимизированным под транспортную задачу, существенно больше и показывает степенную зависимость от объема входных данных. Такой результат объясняется тем, что модуль при планировании учитывает потребности,

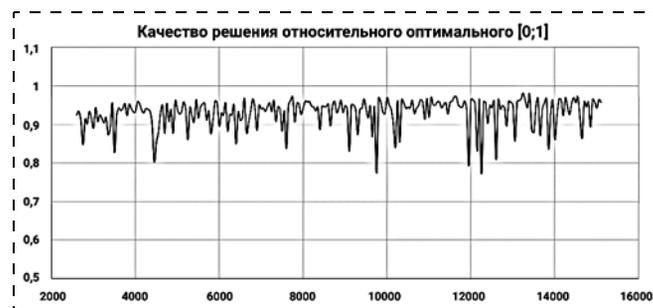


Рис. 5. Качество планирования с использованием закупочных цен

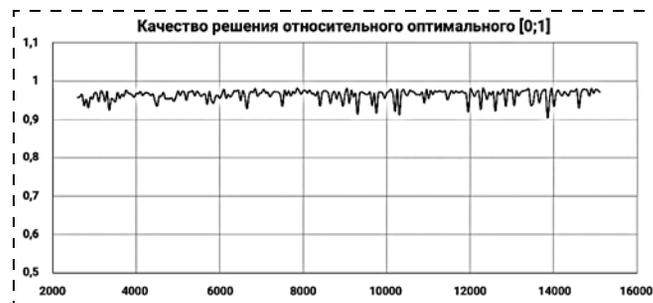


Рис. 6. Качество планирования с использованием стоимости канала "источник — потребитель"

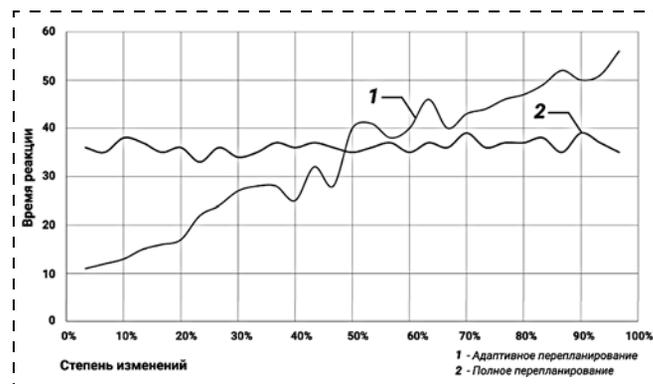


Рис. 7. Сравнение продолжительности адаптивного и полного перепланирования

распределенные по времени, ограничения на объемы доставок и хранения, нелинейные функции стоимости доставки и хранения, многослойные сети доставки, производство и другие особенности, которые исключены из рассмотрения специализированным методом оптимизации.

Более подробное изучение поведения модуля планирования в адаптивных сценариях, когда меняется небольшая часть исходных данных и план не перестраивается полностью, показывает существенное сокращение времени перепланирования по отношению к полной перестройке плана (рис. 7).

Заключение

Реализованный прототип системы управления цепочками поставок показывает, что применение мультиагентного подхода позволяет строить интерактивные решения с легко расширяемой функциональностью и возможностью сбалансирования конфликтных интересов многих участников [12].

Качество получаемых решений ниже оптимального в простых случаях, но позволяет конкурировать с ними за счет более своевременного перестроения плана и за счет учета большего числа факторов в сложных случаях. Применение мультиагентной тех-

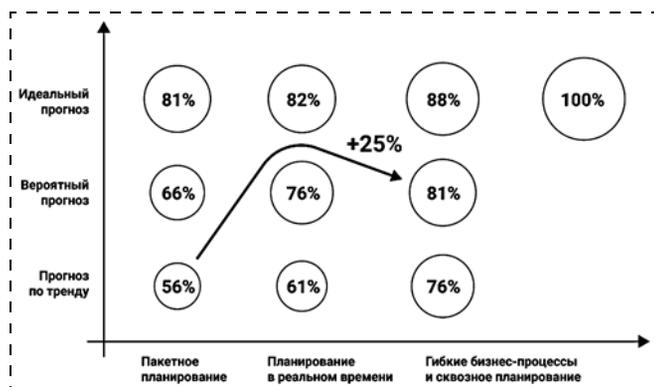


Рис. 8. Прибыль относительно абсолютного недостижимого максимума (отсутствие затрат) при применении разных подходов к прогнозированию, планированию и управлению

нологии более эффективно в ситуациях, когда требуется адаптировать план к небольшим, но важным отклонениям во входных данных, а не обрабатывать полностью новый набор данных.

Проведенные исследования и моделирование показывают, что переход к планированию и управлению в реальном времени может повысить прибыль компании (на примере фактических данных LEGO) на 25 % за счет более быстрой адаптации к изменяющимся условиям (рис. 8).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ.

Список литературы

1. Бурков В. Н. и др. Механизмы управления. Управление организацией: планирование, организация, стимулирование, контроль. М.: ЛЕНАНД, 2013. 215 с.
2. Dynamic modeling and control of supply chain systems: A review // Computers & Operations Research. 2008. Vol. 35, Iss. 11. P. 3530—3561.
3. Rzevski G., Skobelev P. Managing Complexity. Southampton, UK, WIT Press, 2014. 202 с.
4. Leung J. Handbook of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis // CRC Computer and Information Science Series, London: Chapman and Hall / CRC, 2004. 1216 p.
5. Leitao P., Vrba P. Recent Developments and Future Trends of Industrial Agents // Proc. of 5th Int. Conf. on Holonic and Multi-Agent systems in Manufacturing (HoloMAS 2011), France, Toulouse, 2011. Springer, Berlin. P. 15—28.
6. Yann Chevalerey et al. Issues in Multiagent Resource Allocation // Informatica. 2006. Vol. 30. P. 3—31.
7. Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000. 549 с.
8. Pinedo M. Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems. Springer, 2008. 664 p.
9. Malti Baghel, Shikha Agrawal and Sanjay Silakari. Survey of Metaheuristic Algorithms for Combinatorial Optimization // Int. Journal of Computer Applications. 2012. Vol. 58, N. 19. P. 21—31.
10. Davis R., Burns A. A survey of hard real-time scheduling for multi processor systems // ACM Comput. Surv., 2011. Vol. 43, N. 4, article 35. DOI= 10.1145/1978802.1978814.
11. Barsanti L., Sodan A. Adaptive Job Scheduling Via Predictive Job Resource Allocation // Job Scheduling Strategies for Parallel Processing. Springer: Lecture Notes in Computer Science. 2007. Vol. 4376. P. 115—140.
12. Madsen B., Rzevski G., Skobelev P., Tsarev A. Real-time multi-agent forecasting & replenishment solution for LEGO's branded retail outlets // Proc. of 13th ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel / Distributed Computing (SNPD 2012), August 8—10, 2012, Kyoto, Japan. Springer, 2012. P. 451—456.

Management of Network Supply System Based on Multi-Agent Technology

George A. Rzevski, rzevski@gmail.com,
The Open University, MK7 6AA, United Kingdom, Buckinghamshire, Milton Keynes, Walton Hall

Bjorn Madsen, bm@multiagenttechnology.com,
Multi-Agent Technology Ltd, 3 Ashbourne Close, W5 3EF London, United Kingdom

P. O. Skobelev, petr.skobelev@gmail.com,
Samara State Aerospace University, Samara, 443086, Russian Federation,

A. V. Tsarev, tsarev@smartsolutions-123.ru
SEC "Smart Solutions" Ltd., Samara, 443013, Russian Federation

Corresponding author: P. O. Skobelev, D. Sc., Professor,
Samara State Aerospace University, Samara, 443086, Russian Federation,
e-mail: petr.skobelev@gmail.com

Problem statement: Modern supply chains are presented by large-size models. Supply network scheduling requires considerable computing resources and a lot of time. The traditional centralized supply chain management systems cannot handle the increasing complexity of the scheduling tasks in the conditions of fast-changing market situation, fluctuations in supply and demand, various disruptions and unpredictable events. The paper describes a new approach to management of the supply networks based on multi-agent technologies and ontologies. **Methods:** A method of a virtual "round table" is suggested for support of decision-making during supply chain scheduling. Besides, a method of adaptive dynamic supply chain scheduling depending on the events is proposed, which is based on multi-agent technology using ontology. **Results:** A virtual "round table" concept was developed, as well as regulations for coordination of decisions at all the stages of product supplies, and involving all the interested participants in this process. Advantages of the suggested approach are illustrated by an example of multi-criteria decision-making under condition of company department common values. Main components of the client-server architecture for the multi-agent system of the network supply management were singled out. The decision to use ontology for description of the concept knowledge necessary for the chain supply management was substantiated. The developed models and scheduling methods ensure an adaptive dynamic supply scheduling in a real-time mode in accordance with the individual orders and demand forecast for any time-period and with any details. **Practical value:** application of the multi-agent system for the network supply management is most efficient in the situations, when it is necessary to adapt a schedule to small, but important deviations of the input data instead of processing a new set of data. The conducted research and modeling demonstrate that a transfer to a real-time scheduling and management will make it possible to increase the companies' profits due to a quicker adaptation to the changing conditions.

Keywords: supply chain, multi-agent technology, ontology, real-time, virtual "roundtable", adaptability, scheduling

For citation:

Rzevski G. A., Madsen B., Skobelev P. O., Tsarev A. V. Management of Network Supply System Based on Multi-Agent Technology, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 7, pp. 497–504.

DOI: 10.17587/mau.16.497-504

References

1. Burkov V. N., Novikov D. A., Kondrat'ev V. V. *Mehanizmy upravleniya. Upravlenie organizatsiej: planirovanie, organizatsija, stimulirovanie, kontrol'* (Management mechanisms. Organization management: planning, organization, stimulation, control), Moscow, LENAND, 2013, 215 p. (in Russian).
2. Dynamic modeling and control of supply chain systems: A review, *Computers & Operations Research*, 2008, vol. 35, iss. 11, pp. 3530–3561.
3. Rzevski G., Skobelev P. *Managing Complexity*, WIT Press, 2014, 202 p.
4. Leung J. *Handbook of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis*, *CRC Computer and Information Science Series*, London, Chapman and Hall/CRC, 2004, 1216 p.
5. Leitao P., Vrba P. Recent Developments and Future Trends of Industrial Agents, *Proc. of 5th Int. Conf. on Holoic and Multi-Agent systems in Manufacturing (HoloMAS 2011)*, France, Toulouse, 2011, Springer, Berlin, pp. 15–28.
6. Chevalyere Y., Dunne P. E., Endriss U., Lang J., Lemaitre M., Maudet N., Padget J., Padget J., Rodriguez-Aguilar J. A., Sousa P. Issues in Multiagent Resource Allocation, *Informatica*, 2006, vol. 30, pp. 3–31.
7. Miroshnik I. V., Nikiforov V. O., Fradkov A. L. *Nelinejnoe i adaptivnoe upravlenie slozhnymi dinameskimi sistemami* (Nonlinear and adaptive management of complex dynamic systems), Saint-Petersburg, Nauka, 2000, 549 p. (in Russian).
8. Pinedo M. *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*, Springer, 2008, 664 p.
9. Malti Baghel, Shikha Agrawal and Sanjay Silakari. Survey of Metaheuristic Algorithms for Combinatorial Optimization, *Int. Journal of Computer Applications*, 2012, vol. 58, no. 19, pp. 21–31.
10. Davis R., Burns A. A survey of hard real-time scheduling for multi processor systems, *ACM Comput. Surv.*, 2011, vol. 43, no. 4, article 35. DOI = 10.1145/1978802.1978814.
11. Barsanti L., Sodan A. Adaptive Job Scheduling Via Predictive Job Resource Allocation, Job Scheduling Strategies for Parallel Processing, Springer, *Lecture Notes in Computer Science*, 2007, vol. 4376, pp. 115–140.
12. Madsen B., Rzevski G., Skobelev P., Tsarev A. Real-time multi-agent forecasting & replenishment solution for LEGOs branded retail outlets, *Proc. of 13th ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD 2012)*, August 8–10, 2012, Kyoto, Japan, Springer, 2012, pp. 451–456.

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 29.04.2015. Подписано в печать 16.06х.2015. Формат 60х88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН715. 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.