

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, ПРАВЛЕНИЕ

Издается с 2000 года

ISSN 1684-6427

Том 16
2015
№ 6

DOI 10.17587/issn.1684-6427

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ИНТЕЛЛЕКТАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Анисимов Д. Н., Дроздова Е. Д., Новиков В. Н.** Исследование влияния степеней значимости подусловий на динамические характеристики нечеткого логического регулятора 363

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Брискин Е. С., Серов В. А., Фоменко С. С., Шаронов Н. Г., Шурыгин В. А.** Об определении допустимых параметров движителей шагающих роботов 369
- 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 1 373
- Даринцев О. В., Алексеев А. Ю., Юдинцев Б. С.** Технологии расширенной и виртуальной реальностей как средства компенсации информационной недостаточности микроботов. 380

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ В БОЛЬШИХ СИСТЕМАХ

- Данилов А. Н., Столбов В. Ю.** Об одном алгоритме управления синергетической открытостью организационно-технических систем 387
- Полищук Ю. В.** Мониторинг информационной энтропии в задачах описания больших технических систем 396

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

- Чичерова Е. В.** Способы повышения качества управления частотой вращения силовой турбины газотурбинного двигателя 402
- Лебедев В. А., Ярос Ю. А.** Сравнительный анализ автоматических систем управления при автоматической сварке под флюсом. 409

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

- Инсаров В. В., Тихонова С. В., Ранкова А. В., Фортинский Д. А.** Использование градиентного подхода в задаче выделения контуров крупных техногенных объектов на изображениях многообъектных наземных сцен 415

СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ

- Тимошенков С. П., Калугин В. В., Парфёнов Н. М., Анчутин С. А., Кочурина Е. С.,
Мукимов Д. Ж., Чжо Мьё Аунг.** Исследование и разработка методов оценки основных параметров микромеханических преобразователей линейного ускорения 422
- Девятисильный А. С., Стоценко А. К.** Модели управления относительным движением двух сухопутных транспортных единиц в задаче следования за лидером 426

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

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

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Vol. 16
2015
No. 6

Published since 2000

ISSN 1684-6427

DOI 10.17587/issn.1684-6427

CONTENTS

SMART TECHNOLOGIES IN AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS

- Anisimov D. N., Drozdova E. D., Novikov V. N.** Research of the Influence of the Sub-Conditions Measure of Significance on the Dynamic Characteristics of a Fuzzy Logic Controller 363

ROBOT-TECHNOLOGICAL SYSTEMS

- Briskin E. S., Serov V. A., Fomenko S. S., Sharonov N. G., Shurygin V. A.** Definition of the Admissible Parameters of the Walking Robots' Movers 369

- 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 1 373

- Darintsev O. V., Alekseyev A. Yu., Yudincev B. S.** Technologies of Augmented and Virtual Realities as Means for Compensation for the Information Insufficiency of Microbots 380

INFORMATION CONTROL AND PROCESSING IN BIG SYSTEMS

- Danilov A. N., Stolbov V. Yu.** An Algorithm for Control of the Synergetic Openness of the Organizational and Technical Systems 387

- Polishchuk Y. V.** Monitoring of the Information Entropy for the Description of Large Technical Systems 396

CONTROL AUTOMATION FOR TECHNOLOGICAL OBJECTS AND PROCESSES

- Chicherova E. V.** Methods for Improvement of the Quality of the Power Turbine Speed Control of a Gas Turbine Engine 402

- Lebedev V. A., Jaros Yu. A.** Comparative Analysis of the Automatic Control Systems during Automatic Submerged Arc Welding 409

TECHNIQUES AND TECHNOLOGIES FOR IMAGE PROCESSING

- Insarov V. V., Tikhonova S. V., Rankova A. V., Fortinsky D. A.** Gradient Approach to the Task of Contour Extraction of Big Anthropogenic Objects in the Images of Multi-Object Ground Scenes 415

NAVIGATION AND TRAFFIC CONTROL SYSTEMS

- Timoshenkov S. P., Kalugin V. V., Parfenov N. M., Antchutin S. A., Kochurina E. S., Mukimov D. W., Jo Had Aung.** Research and Development of the Methods for Estimation of the Main Parameters of the Micromechanical Transducers of Linear Acceleration 422

- Devyatil'shny A. S., Stotsenko A. K.** Models of Terrestrial Transport Motion for a Group of Two Units in Terms of the Leader-Following Problem 426

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

МЕТОДЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.511.46

Д. Н. Анисимов, канд. техн. наук, доц., AnisimovDN@mpei.ru,

Е. Д. Дроздова, студент, В. Н. Новиков, аспирант,

Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва

Исследование влияния степеней значимости подусловий на динамические характеристики нечеткого логического регулятора¹

Предложена модификация правил нечеткого логического вывода для случаев, когда подусловия имеют различную значимость. Показано, что учет степеней значимости подусловий позволяет более адекватно отражать реальность в задачах принятия решений, в том числе целенаправленно воздействовать на динамику нечеткой системы управления.

Ключевые слова: нечеткий логический вывод, агрегирование подусловий, степень истинности, степень значимости, нечеткий регулятор, аппроксимирующая модель, ПД регулятор

Введение

Анализ работы нечетких систем автоматического управления позволил выявить следующие основные факторы, влияющие на качество управления [1]:

- число термов входных и выходных переменных;
- вид функций принадлежности нечетких переменных, составляющих терм-множества лингвистических переменных;
- характер нечеткого соответствия между пространством предпосылок и пространством заключений;
- способ дефазификации;
- выбор логического базиса, т. е. тех или иных Т-норм и S-норм [2, 3].

Варьируя эти факторы, мы, по существу, изменяем параметры настройки нечеткого регулятора для достижения наилучших показателей качества системы. В тех случаях, когда мы имеем дело с динамическим объектом, нас помимо сигнала рассогласования, как правило, интересует, по меньшей мере, его первая производная. В традиционных системах автоматического управления имеется возможность изменять параметры регуляторов (ПИД, ПД и др.) по отдельности [4]. В нечетких же регуляторах эта возможность ограничивается спецификой агрегирования подусловий, поскольку в большинстве известных алгоритмов при агрегировании используется Т-норма (как правило, min-конъюнкция). В данном исследовании предлагается процедура определения значения истинности условия, учитывающая различную значимость отдельных подусловий [5], в том числе применительно к задаче управления динамическим объектом.

При построении систем, основанных на нечетких логических выводах, наибольшее распространение получили алгоритмы Мамдани [6], Ларсена [7], Щукамото [8], Сугено — Такаги [9], а также реляционные модели [10]. При реализации этих алгоритмов необходимо выполнение следующих основных этапов [11, 12]:

- формирование базы правил систем нечеткого вывода;
- фазификация (введение нечеткости);
- агрегирование степеней истинности предпосылок правил;
- активизация заключений правил;
- аккумуляция заключений;
- дефазификация (приведение к четкости).

В статье рассматривается модификация процедуры агрегирования степени истинности предпосылок правил, которая учитывает степени значимости подусловий в правилах нечеткого логического вывода, и оценивается их влияние на динамические свойства нечеткого логического регулятора (НЛР).

Агрегирование подусловий с учетом степеней их значимости

Как можно заметить, число факторов, влияющих на результат нечеткого логического вывода, достаточно велико, что затрудняет целенаправленный поиск решения, обеспечивающего заданные показатели качества системы. Тем не менее, в работе [5] было предложено ввести в рассмотрение еще один фактор, а именно степени значимости подусловий в правилах логического вывода. Это было продиктовано следующими соображениями.

1. В процессе принятия решений человек оценивает не только степень истинности какого-либо

¹ Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 13-01-00082-а).

подусловия, но и степень его значимости. Приведем простой пример.

Преподаватель принимает решение о возможности поставить тому или иному студенту учебной группы зачет "автоматом". При этом он руководствуется следующим правилом.

Π_1 . Если "Посещаемость лекций (x_1)" = "Высокая (A_{11})" ($F_{11} = 0,2$)

И "Лабораторные работы (x_2)" = "Выполнены и защищены (A_{12})" ($F_{12} = 1,0$)

И "Активность на практических занятиях (x_3)" = "Высокая (A_{13})" ($F_{13} = 0,4$)

И "Контрольные работы (x_4)" — "Написаны безупречно (A_{14})" ($F_{14} = 0,8$)

TO "Можно студенту проставить зачет "автоматом", где F_{11}, \dots, F_{14} — степени значимости соответствующих критериев.

2. Как было показано в ряде исследований (например, в работах [13, 14]), изменяя настройки НЛР, можно в той или иной степени влиять на динамику системы управления. Так, например, изменяя форму функций принадлежности термов входных лингвистических переменных "Рассогласование" и "Производная", можно по отдельности изменять параметры аппроксимирующего ПД регулятора [15]. Однако такой способ представляется довольно трудоемким. Поэтому было бы желательно разработать некоторый механизм, позволяющий непосредственно воздействовать на пропорциональную и дифференциальную составляющие НЛР, как это происходит при настройке линейного ПД регулятора.

В задаче принятия решения возникает вопрос о формализации процедуры оценивания степени истинности предпосылки. Покажем, как можно получить такую оценку на основе известных методов [11, 12, 16].

При выполнении гипотезы о взаимной независимости выходных переменных база нечетких производственных правил с MIMO-структурой (MIMO — Multiple Input — Multiple Output) и конъюнктивной формой заключения может быть представлена совокупностью L правил с MISO-структурой (MISO — Multiple Input — Single Output) со многими (n) входными и одной выходной переменными. В этом случае правила будут иметь следующий вид:

$$\Pi_l: \text{ЕСЛИ } x_1 \text{ есть } \tilde{A}_1 \text{ И } \dots \text{ И } x_m \text{ есть } \tilde{A}_n, \\ TO y \text{ есть } \tilde{B}_l \text{ } (F_l), l = \overline{1, L}. \quad (1)$$

В тех случаях, когда подусловия в предпосылке соединены нечеткой логической операцией "ИЛИ" (дизъюнктивная форма), нечеткое правило может быть представлено несколькими правилами. Например, одно правило

$$\text{ЕСЛИ } x_1 \text{ есть } \tilde{A}_1 \text{ ИЛИ } x_2 \text{ есть } \tilde{A}_2, \\ TO y \text{ есть } \tilde{B} \text{ } (F) \quad (2)$$

можно представить двумя следующими правилами:

$$\text{ЕСЛИ } x_1 \text{ есть } \tilde{A}_1, TO y \text{ есть } \tilde{B} \text{ } (F); \quad (3)$$

$$\text{ЕСЛИ } x_2 \text{ есть } \tilde{A}_2, TO y \text{ есть } \tilde{B} \text{ } (F).$$

Однако очевидно, что степени значимости этих двух правил могут быть различными, т. е. в общем случае можно записать

$$\text{ЕСЛИ } x_1 \text{ есть } \tilde{A}_1, TO y \text{ есть } \tilde{B} \text{ } (F_1); \quad (4)$$

$$\text{ЕСЛИ } x_2 \text{ есть } \tilde{A}_2, TO y \text{ есть } \tilde{B} \text{ } (F_2)$$

или, объединяя эти правила,

$$\text{ЕСЛИ } x_1 \text{ есть } \tilde{A}_1 \text{ } (F_1) \text{ ИЛИ } x_2 \text{ есть } \tilde{A}_2 \text{ } (F_2), \\ TO y \text{ есть } \tilde{B}. \quad (5)$$

При этом степень истинности заключения определяется как

$$\mu_B(y) = F_1 \cdot \mu_{A_1}(x_1) \vee F_2 \cdot \mu_{A_2}(x_2). \quad (6)$$

(В данном контексте операция (\cdot) трактуется как Т-норма в алгебраическом логическом базисе [1—3, 14], и она эквивалентна операции умножения на интервале $[0; 1]$.)

Таким образом, при записи предпосылки в дизъюнктивной форме каждому из подусловий можно непосредственно приписывать некоторый весовой коэффициент, отражающий степень его значимости.

Однако если подусловия связаны логической операцией "И" (конъюнктивная форма (1)) и их значимость не одинакова, то степень истинности заключения нельзя получить по аналогии с формулой (6), заменив лишь операцию дизъюнкции на операцию конъюнкции. В этом легко убедиться, рассмотрев, например, случай, когда значимость какого-либо подусловия мала. Тогда степень истинности заключения будет также мала вне зависимости от выполнения других, более важных подусловий. Поэтому предлагается следующий подход. Пусть некоторое правило описывается продукцией

$$\text{ЕСЛИ } x_1 \text{ есть } \tilde{A}_1 \text{ } (F_1) \text{ И } x_2 \text{ есть } \tilde{A}_2 \text{ } (F_2), \\ TO y \text{ есть } \tilde{B}. \quad (7)$$

Запишем отрицание этого выражения, применив к нему правило де Моргана:

$$\text{ЕСЛИ } x_1 \text{ есть } \text{НЕ } \tilde{A}_1 \text{ } (F_1) \text{ ИЛИ } x_2 \text{ есть } \text{НЕ } \tilde{A}_2 \text{ } (F_2), \\ TO y \text{ есть } \text{НЕ } \tilde{B}. \quad (8)$$

Степень истинности заключения в этом случае равна

$$\mu_{\neg B}(y) = F_1 \cdot \mu_{\neg A_1}(x_1) \vee F_2 \cdot \mu_{\neg A_2}(x_2). \quad (9)$$

Зависимость рейтинговых оценок студентов от основных показателей успеваемости

Студент	$\mu_{A_1}(x_1)$ ($F_1 = 0,2$)	$\mu_{A_2}(x_2)$ ($F_2 = 1$)	$\mu_{A_3}(x_3)$ ($F_3 = 0,4$)	$\mu_{A_4}(x_4)$ ($F_4 = 0,8$)	$\mu_B(y)$	
				Максминный базис	Алгебраический базис	
C1	1	0,5	0,7	0,6	$1 \wedge 0,5 \wedge 0,7 \wedge 0,6 = 0,5$ (0,5)	$1 \cdot 0,5 \cdot 0,88 \times 0,68 = 0,3$ (0,21)
C2	0,6	0,9	0,5	0,8	$0,8 \wedge 0,9 \wedge 0,6 \wedge 0,8 = 0,6$ (0,5)	$0,92 \cdot 0,9 \cdot 0,8 \times 0,84 = 0,56$ (0,22)
C3	0,2	1	0,3	1	$0,8 \wedge 1 \wedge 0,6 \wedge 0,9 = 0,6$ (0,2)	$0,84 \cdot 1 \cdot 0,72 \times 1 = 0,6$ (0,06)
C4	0,8	0,9	0,8	0,9	$0,8 \wedge 0,9 \wedge 0,8 \wedge 0,9 = 0,8$ (0,8)	$0,96 \cdot 0,9 \cdot 0,92 \times 0,92 = 0,73$ (0,52)

Тогда

$$\begin{aligned} \mu_B(y) &= \neg[F_1 \cdot \mu_{\neg A_1}(x_1)] \wedge \neg[F_2 \cdot \mu_{\neg A_2}(x_2)] = \\ &= [(1 - F_1) + \mu_{A_1}(x_1) - (1 - F_1) \cdot \mu_{A_1}(x_1)] \wedge \\ &\quad \wedge [(1 - F_2) + \mu_{A_2}(x_2) - (1 - F_2) \cdot \mu_{A_2}(x_2)] = \\ &= [1 - F_1(1 - \mu_{A_1}(x_1))] \wedge [1 - F_2(1 - \mu_{A_2}(x_2))]. \quad (10) \end{aligned}$$

Очевидно, что данный подход может быть распространен на предпосылки с любым числом подусловий.

Заметим, что в выражении (10) используются как операция дизъюнкции, так и алгебраическое произведение.

В статье предлагается использование степеней значимости подусловий для произвольного логического базиса. Тогда степень истинности заключения определяется в соответствии с выражением

$$\mu_B(y) = \prod_{i=1}^n [1 - F_i T(1 - \mu_{A_i}(x_i))], \quad (11)$$

где x_i — входные лингвистические переменные; \tilde{A}_i — их нечеткие значения; F_i — степени значимости подусловий ($F_i \in [0; 1]$); y — выходная лингвистическая переменная; \tilde{B} — ее нечеткое значение; $\mu_{A_i}(x_i)$ — степени истинности подусловий; $\mu_B(y)$ — степень истинности заключения; T — заданная операция Т-нормы; n — число подусловий в данном правиле.

В частном случае при выборе максминного базиса ($aTb = a \wedge b$) выражение (11) принимает вид

$$\begin{aligned} \mu_B(y) &= [1 - F_1 \wedge (1 - \mu_{A_1}(x_1))] \wedge \dots \\ &\quad \dots \wedge [1 - F_2 \wedge (1 - \mu_{A_2}(x_2))]. \quad (12) \end{aligned}$$

При выборе алгебраического базиса ($aTb = ab$)

$$\begin{aligned} \mu_B(y) &= \\ &= [1 - F_1(1 - \mu_{A_1}(x_1))] \cdot \dots \cdot [1 - F_n(1 - \mu_{A_n}(x_n))]. \quad (13) \end{aligned}$$

Вернемся к примеру, рассмотренному выше. На основе степени выполнения этих подусловий и выражения (11) рассчитывается степень уверенности преподавателя в том, что данный студент заслуживает зачета "автоматом" с оценкой "отлично" ($\mu_B(y)$). Эту степень уверенности можно трактовать как рейтинговый балл студента при изучении дисциплины. При этом положительное решение при-

нимается в том случае, если этот балл оказывается выше некоторого порогового значения α . В противном случае он может быть учтен при дальнейшей сдаче зачета.

Некоторые примеры расчета рейтинговой оценки студентов C1, C2, C3, C4 при использовании максминного (12) и алгебраического (13) базисов приведены в таблице (в скобках указаны степени истинности предпосылки, полученные без учета степеней значимости подусловий).

Как можно заметить, степень истинности предпосылки с учетом степеней значимости подусловий оказывается не ниже, чем без их учета. Данный результат, на наш взгляд, в большей мере согласуется с рассуждениями лица, принимающего решения.

Использование степеней значимости подусловий при построении нечеткого ПД регулятора

Оценим возможность использования степеней значимости подусловий при настройке нечеткого логического регулятора (НЛР) для управления динамическими объектами.

В данной статье будем рассматривать нечеткий регулятор, имеющий два входа, на которые подаются рассогласование системы и его производная, и один выход, представляющий собой сигнал управления, подаваемый на объект (рис. 1). Для наглядности выберем объект с достаточно простой передаточной функцией

$$W_o(s) = \frac{K_o}{s(1 + s T_o)}, \quad (14)$$

где $K_o = 2 \text{ c}^{-1}$, $T_o = 0,2 \text{ с}$ — известные параметры объекта.

Здесь $u(t)$ — сигнал на входе системы, $e(t)$ — сигнал рассогласования; $d(t)$ — его производная; $x(t)$ — сигнал управления; $y(t)$ — сигнал на выходе системы; s — оператор Лапласа.

Для описания НЛР введем лингвистические переменные {"Рассогласование" ("e"), T_E , E }, {"Про-

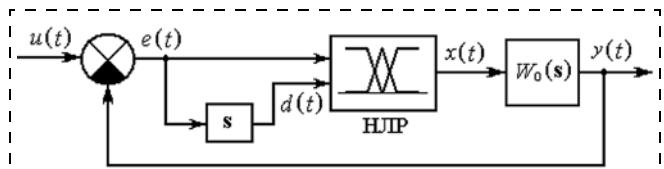


Рис. 1. Структурная схема нечеткой системы управления

изводная" (" d "), T_D, D , "Управление" (" x "), T_X, X , где $E = [-1; 1]$, $D = [-1; 0]$, $X = [-10; 10]$ — их области определения, $T_E = \{T_E^1, T_E^2, T_E^3\} = \{"-", "0", "+"\}$, $T_D = \{T_D^1, T_D^2, T_D^3\} = \{"-", "0", "+"}$, $T_X = \{T_X^1, T_X^2, T_X^3\} = \{"-", "0", "+"}$ — их терм-множества.

В работе [15] для оценки динамических свойств НЛР было предложено использовать его линейную аппроксимирующую модель. В рассматриваемом случае наиболее очевидным представляется выбор

модели в виде форссирующего звена (ПД регулятора) с передаточной функцией

$$W_M(s) = K_P + K_D s. \quad (15)$$

Для построения аппроксимирующей модели НЛР и получения ее параметров используем два следующих способа.

1. Определение параметров K_P и K_D по переходным процессам методом экспоненциальной модуляции [17, 18].

2. Параметрическая идентификация на основе частотных характеристик. Параметр K_P определяется

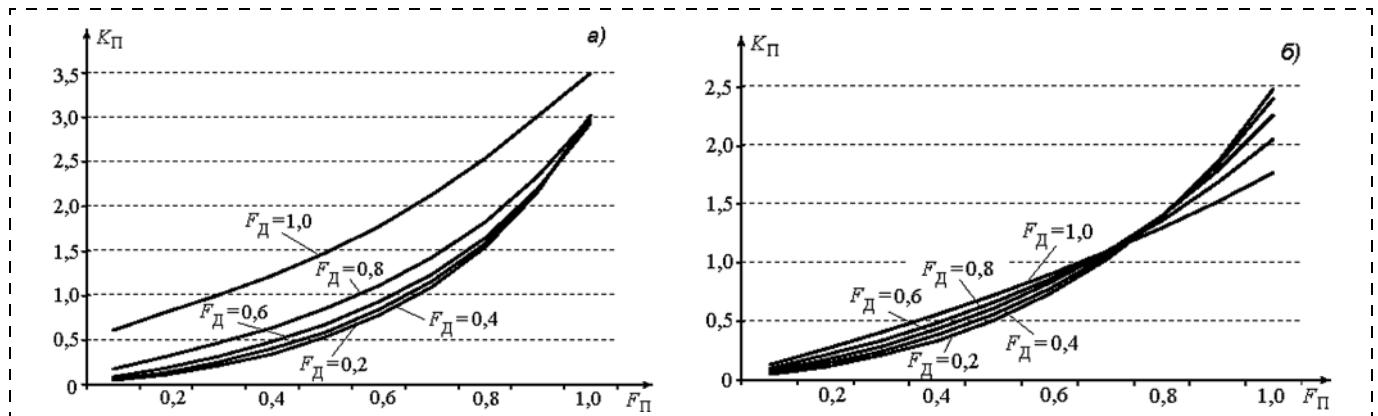


Рис. 2. Зависимости параметра K_P от степени значимости F_{PI} , полученные по переходным процессам (а) и частотным характеристикам (б)

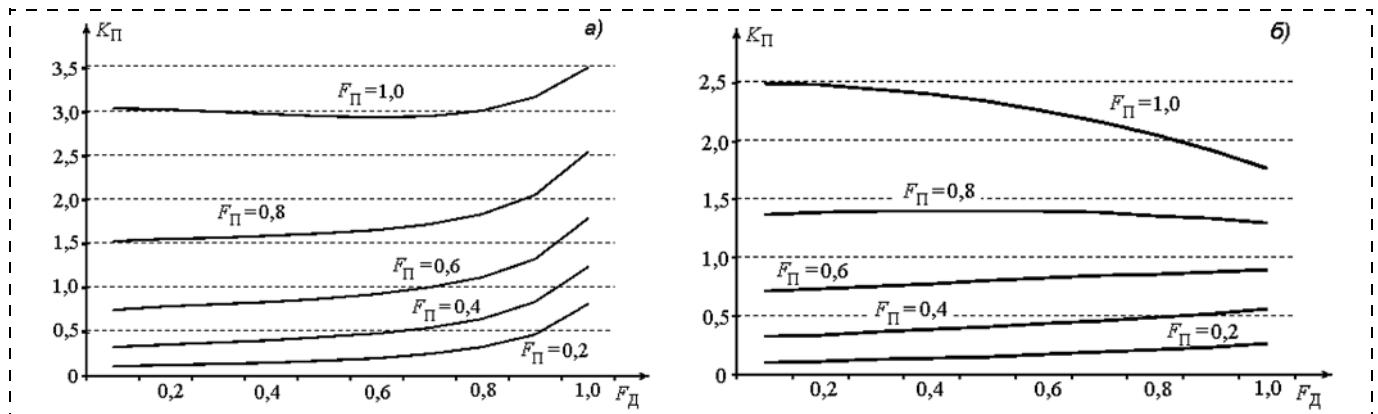


Рис. 3. Зависимости параметра K_P от степени значимости F_D , полученные по переходным процессам (а) и частотным характеристикам (б)

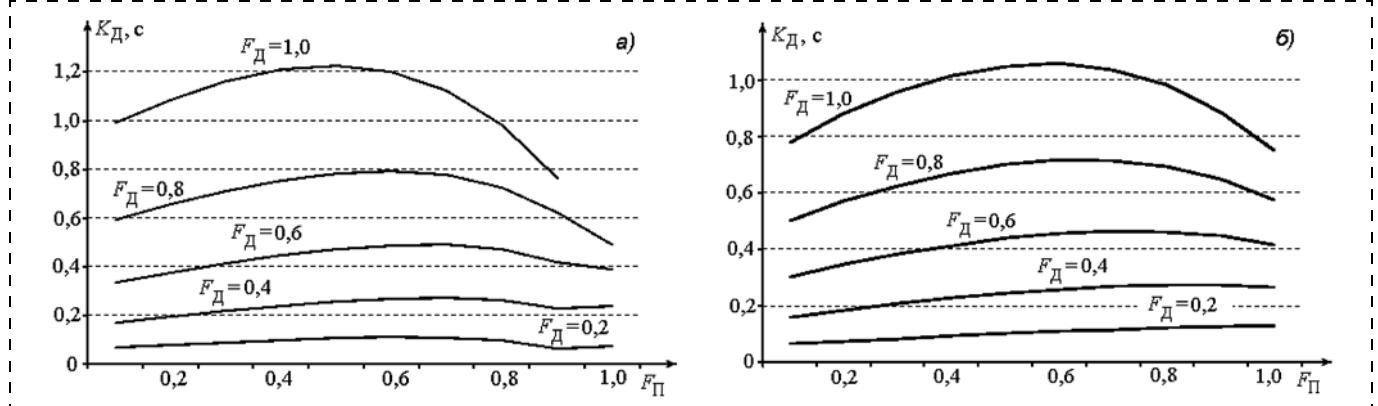


Рис. 4. Зависимости параметра K_D от степени значимости F_{PI} , полученные по переходным процессам (а) и частотным характеристикам (б)

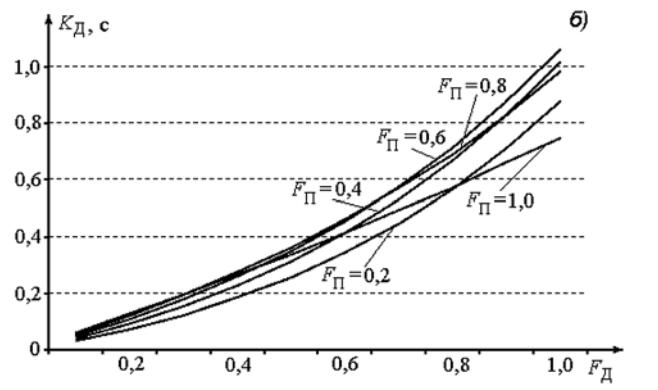
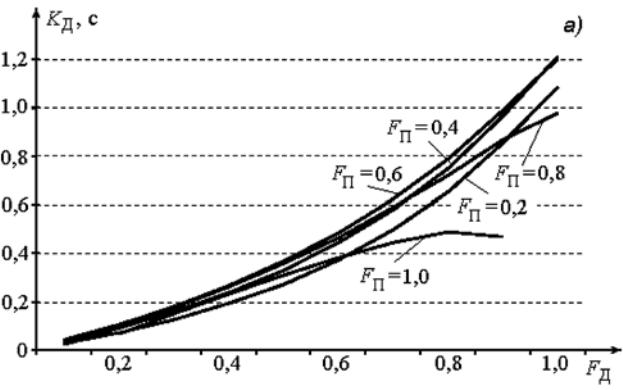


Рис. 5. Зависимости параметра K_D от степени значимости F_D , полученные по переходным процессам (а) и частотным характеристикам (б)

по амплитудно-частотной характеристике на низких частотах ($K_{\Pi} = \lim_{\omega \rightarrow 0} A(\omega)$). Параметр K_D определяется

по фазовой частотной характеристике: $K_D = \frac{K_{\Pi}}{\omega^*}$, где ω^* — частота, на которой фазовый сдвиг $\phi(\omega^*)$ принимает значение $\frac{\pi}{4}$.

Семейства зависимостей параметров K_{Π} и K_D от степени значимости F_{Π} и F_D , полученные двумя способами, приведены на рис. 2—5.

Анализ этих зависимостей показывает, что увеличение степени значимости того или иного входа НЛР приводит к увеличению одноименного параметра аппроксимирующего ПД регулятора и слабо влияет на другой параметр. Это свидетельствует о возможности воздействия на динамические характеристики НЛР путем изменения степеней значимости подусловий, определяющих нечеткие значения каждой из входных лингвистических переменных.

Заметим, что оба способа определения параметров аппроксимирующего ПД регулятора являются приближенными, однако близость представленных зависимостей позволяет судить о достоверности полученных результатов.

Выводы

1. Рассмотрена модификация правил нечеткого логического вывода для случаев, когда подусловия имеют различную значимость.

2. Определена формула для вычисления степени истинности заключения.

3. Проведены исследования влияния степени значимости подусловий на параметры линеаризованной модели НЛР двумя различными способами.

4. Исследования показали, что оба способа показывают схожие результаты.

5. Сделан вывод о целесообразности использования способа настройки НЛР для динамических объектов, основанного на введении степеней значимости подусловий.

Список литературы

1. Анисимов Д. Н. Использование нечеткой логики в системах автоматического управления // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2001. № 8. С. 39—42.
2. Прикладные нечеткие системы: Пер. с япон. / К. Асай, Д. Ватада, С. Иваи и др.; под ред. Т. Тэрено, К. Асай, М. Сугэно. М.: Мир, 1993. 368 с.
3. Батыршин И. З. Основные операции нечеткой логики и их обобщения. Казань: Отечество, 2001. 102 с.
4. Ротач В. Я. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 396 с.
5. Анисимов Д. Н., Ситников К. Ю. Методика построения нечетких реляционных систем автоматического управления // Вестник МЭИ. 2012. № 3. С. 77—82.
6. Mamdani E. H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with fuzzy logic controller // Int. J. Man-Machine Studies. 1975. Vol. 7, N. 1. P. 1—13.
7. Larsen P. M. Industrial applications of fuzzy logic control // Int. J. Man-Machine Studies. 1980. Vol. 12, N. 1. P. 3—10.
8. Tsukamoto Y. An approach to fuzzy reasoning method // Advances in Fuzzy Sets Theory and Applications. M. M. Gupta, Ragade R. K. and Yager R. R. (Eds.). North-Holland, Amsterdam, 1979. P. 137—149.
9. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics. 1985. Vol. 15, N. 1.
10. Pedrycz W. Fuzzy Control and Fuzzy Systems. New York: John Wiley and Sons, 1993.
11. Борисов В. В., Круглов В. В., Федулов А. С. Нечеткие модели и сети. М.: Горячая линия — Телеком, 2007. 284 с.
12. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. С. 178—221.
13. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Ситников М. С. Исследование периодических колебаний в системах управления с нечеткими регуляторами // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. Т. 11. № 6. С. 37—45.
14. Анисимов Д. Н., Новиков В. Н., Сафина Э. А., Ситников К. Ю. Исследование влияния выбора логического базиса на характеристики нечеткого регулятора // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 8 (149). С. 12—17.
15. Анисимов Д. Н., Дроздова Е. Д., Новиков В. Н. Построение аппроксимирующей модели нечеткого регулятора на основе идентификации методом экспоненциальной модуляции // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 9. С. 6—12.
16. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2009. 798 с.
17. Анисимов Д. Н. Идентификация линейных динамических объектов методом экспоненциальной модуляции // Вестник МЭИ. 1994. № 2. С. 68—72.
18. Анисимов Д. Н., Хрипков А. В. Законы распределения оценок параметров динамических объектов при идентификации методом экспоненциальной модуляции // Проблемы управления. 2007. № 4. С. 18—21.

Research of the Influence of the Sub-Conditions Measure of Significance on the Dynamic Characteristics of a Fuzzy Logic Controller

D. N. Anisimov, anisimovdn@mpei.ru, **E. D. Drozdova**, drozdova@mail.ru,
V. N. Novikov, aximas17@yandex.ru, National Research University
"Moscow Power Engineering Institute", Moscow, 111250, Russian Federation

Received on July 23, 2014

Analysis of operation of the fuzzy control systems shows that there are many factors influencing the quality control such as a number of terms of the input and output variables, forms of values of the linguistic variables constituting its term-sets membership functions, character of the fuzzy relation between the antecedent and consequent spaces (rule base), etc. By varying these factors we can change the parameters of the fuzzy controller for achievement of a satisfactory quality control. Comparing the fuzzy controllers with the traditional linear ones (such as PD-, PID-controllers, etc.) one can notice that the parameters of the linear controllers can be tuned separately. But, when we deal with the fuzzy controllers, any variation of the above mentioned factors has a simultaneous influence on the integral, proportional and differential components of a signal. This is due to numerous logical interactions between the input variables. Furthermore, the specific character of the aggregation of the sub-conditions in the most commonly used fuzzy inference algorithms based on the triangular norm operations does not make it possible to take into account the desired force of each component. An approach proposed in the paper makes it possible to vary one of the signal components within a wide range, leaving the other components practically steady. This in turn simplifies tuning of a fuzzy logic controller.

Keywords: fuzzy logic inference, aggregation of sub-conditions, truth degrees, measure of significance, fuzzy controller, approximating model, PD-controller

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 13-01-00082-a

For citation:

Anisimov D. N., Drozdova E. D., Novikov V. N. Research of the Influence of the Sub-Conditions Measure of Significance on the Dynamic Characteristics of a Fuzzy Logic Controller, *Mekhanika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 6, pp. 363–368.

DOI: 10.17587/mau.16.363-368

References

1. **Anisimov D. N.** *Ispol'zovanie nechetkoi logiki v sistemakh avtomaticheskogo upravleniya* (Fuzzy logic using in automatic control systems), *Pribyti i Sistemy. Upravlenie, Kontrol', Diagnostika*, 2001, no. 8, pp. 39–41 (in Russian).
2. **Asai K., Watada D., Imai S.** i dr. *Prikladnye nechetkie sistemy* (Applied fuzzy systems), Moscow, Mir, 1993, 368 p. (in Russian).
3. **Batyryshin I. Z.** *Osnovnye operatsii nechetkoi logiki i ikh obobshcheniya* (Main operations of fuzzy logic and their generalization), Kazan', Otechestvo, 2001, 102 p. (in Russian).
4. **Rotach V. Ja.** *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* (The theory of automatic control: Textbook for institution of higher education), Moscow, Izdatel'skij dom MJeI, 2008, 396 p. (in Russian).
5. **Anisimov D. N., Sitnikov K. Ju.** *Metodika postroeniya nechetkikh relyatsionnykh sistem avtomaticheskogo upravleniya* (A method of fuzzy relational automatic control systems construction), *Vestnik MJeI*, 2012, no. 3, pp. 77–82 (in Russian).
6. **Mamdani E. H., Assilian S.** An experiment in linguistic synthesis with fuzzy logic controller, *Int. J. Man-Machine Studies*, 1975, vol. 7, no. 1, pp. 1–13.
7. **Larsen P. M.** Industrial applications of fuzzy logic control, *Int. J. Man-Machine Studies*, 1980, vol. 12, no. 1, pp. 3–10.
8. **Tsukamoto Y.** An approach to fuzzy reasoning, *Advances in Fuzzy Sets Theory and Applications*, North-Holland, Amsterdam, 1979, pp. 137–149.
9. **Takagi T., Sugeno M.** Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control, *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, 1985, vol. 15, no. 1.
10. **Pedrycz W.** Fuzzy Control and Fuzzy Systems, New York, John Wiley and Sons, 1993.
11. **Borisov V. V., Kruglov V. V., Fedulov A. S.** *Nechetkie modeli i seti* (Fuzzy models and networks), Moscow, Gorjachaja linija–Telekom, 2007, 284 p. (in Russian).
12. **Leonenkov A. V.** *Nechetkoe modelirovaniye v srede MATLAB i fuzzyTECH* (Fuzzy modeling using MATLAB and fuzzyTECH), SPb., BHV-Peterburg, 2003, p. 178–221 (in Russian).
13. **Makarov I. M., Lohin V. M., Man'ko S. V., Romanov M. P., Sitnikov M. S.** *Issledovanie periodicheskikh kolebanii v sistemakh upravleniya s nechetkimi regul'yatorami* (Research of periodic fluctuations in control systems with fuzzy regulators), *Informacionno-Izmeritel'nye i Upravljajushchie Sistemy*, 2013, vol. 11, no. 6, pp. 37–45 (in Russian).
14. **Anisimov D. N., Novikov V. N., Safina Je. A., Sitnikov K. Ju.** *Issledovanie vliyanija vybora logicheskogo bazisa na kharakteristiki nechetkogo regul'yatora* (Research of logical basis choice influence on fuzzy regulator characteristics), *Mehatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2013, no. 8 (149), pp. 12–17 (in Russian).
15. **Anisimov D. N., Drozdova E. D., Novikov V. N.** Postroenie apoksimiruyushchei modeli nechetkogo regul'yatora na osnove identifikatsii metodom eksponentsiyal'noi modulyatsii (Construction of fuzzy regulator approximating model based on identification by the method of exponential modulation), *Mehatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2014, no. 9 (in Russian).
16. **Pegat A.** *Nechetkoe modelirovaniye i upravlenie* (Fuzzy modeling ad control), Moscow, Binom. Laboratoriya znanij, 2009, 798 p. (in Russian).
17. **Anisimov D. N.** *Identifikatsiya lineinykh dinamicheskikh ob'ektorov metodom eksponentsiyal'noi modulyatsii* (Identification of linear dynamic objects by the method of exponential modulation), *Vestnik MJeI*, 1994, no. 2, pp. 68–72 (in Russian).
18. **Anisimov D. N., Hripkov A. V.** *Zakony raspredeleniya otsenok parametrov dinamicheskikh ob'ektorov pri identifikatsii metodom eksponentsiyal'noi modulyatsii* (Distribution laws of dynamic objects' parameter estimates in the identification by exponential modulation method), *Problemy Upravlenija*, 2007, no. 4, pp. 18–21 (in Russian).

Corresponding author:

D. N. Anisimov, Ph. D., Associate Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, 111250, Russian Federation, e-mail: anisimovdn@mpei.ru

УДК 629.369

Е. С. Брискин¹, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой, dtm@vstu.ru,
В. А. Серов², канд. техн. наук, зам. генерального конструктора по проектированию,
С. С. Фоменко¹, аспирант, **Н. Г. Шаронов¹**, канд. техн. наук, доц.,
В. А. Шурыгин¹, д-р техн. наук, зав. кафедрой,
¹ Волгоградский государственный технический университет
² ОАО "ЦКБ "Титан"

Об определении допустимых параметров движителей шагающих роботов¹

На основе показателей, характеризующих качество шагающих роботов, в пространстве параметров движителей строится область, обеспечивающая допустимые значения показателей. Предложенный метод, позволяющий целенаправленно выбирать необходимые параметры движителей на этапе проектирования, использовался при разработке шагающей машины "Ортоног".

Ключевые слова: шагающий робот, показатель качества, стопа, область допустимых параметров

Введение

Шагающие роботы отличаются друг от друга кинематическими схемами трансмиссии и движителей, системами управления и другими узлами и системами, которые влияют на такие показатели, как профильная, грунтовая или опорная проходимость, экологичность при взаимодействии с грунтом и др. [1, 2].

Рассматривается метод определения допустимой области параметров, обеспечивающий требуемые показатели качества и позволяющий целенаправленно выбирать необходимые параметры движителей при разработке шагающих роботов на этапе проектирования в зависимости от поставленных задач.

Шагающие движители, несмотря на давний и постоянный интерес со стороны большого числа исследователей, не обрели общепринятых конструктивных особенностей, как, например, колесные и гусеничные движители. Поэтому при проектировании новых шагающих машин (например, "Ортоног" [3, 4]) возникают многокритериальные задачи [5].

Одним из главных узлов шагающего робота является шагающий движитель, а его основные параметры — длина шага и площадь опорной поверхности стопы (например, стопы круглой формы машины "Ортоног", рис. 1, см. вторую сторону обложки). Длина шага влияет на энергозатраты при перемещении и, в свою очередь, ограничена габаритными размерами машины и характеристиками приводов.

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-08-01002 а, 14-08-97041 р_поволжье_a).

Площадь опорной поверхности стопы влияет на экологичность при взаимодействии с грунтом, а в совокупности с длиной шага — и на маневренность. Учет этих особенностей возможен при комплексной оценке показателей.

Постановка задачи

Качество конструкции шагающей машины и управление ее движением можно оценить различными показателями. Например, это могут быть частные показатели I_1, I_2, I_3, I_4 , характеризующие соответственно относительную зону бесконтактного преодоления препятствия, длину шага, среднее давление на грунт, среднюю силу сопротивления движению.

Эти частные показатели могут противоречить друг другу. Например, при увеличении длины шага уменьшаются силы сопротивления движению [6, 7], но растут габаритные размеры шагающей машины. Поэтому при поиске компромиссного решения необходимо проводить их комплексный анализ.

Такой метод решения основывается на совместном анализе частных показателей качества

$$I = (I_1, I_2, I_3, I_4). \quad (1)$$

Ставится задача определения значений параметров шагающей машины в виде зависимости между радиусом R круглой стопы механизма шагания (рис. 1, см. вторую сторону обложки) и длиной шага L , обеспечивающих допустимые значения частных показателей.

Для каждого из n частных показателей вводится условие, выполнение которого обеспечивает допустимые значения показателей:

$$I_i \leq [I_i], \quad (2)$$

где $[I_i]$ — предельно допустимое значение i -го частного показателя $I_i = f_i(R, L)$, зависящего от выбранных параметров исследуемого объекта.

Относительная зона бесконтактного преодоления препятствия

Показатель I_1 характеризует относительную зону бесконтактного преодоления препятствия и определяется выражением

$$I_1 = \frac{L - 2R}{L}, \quad (3)$$

где радиус R круглой стопы и длина шага L являются параметрами следовой дорожки механизма шагания (рис. 2).

Под следовой дорожкой понимается последовательность следов одного и того же механизма шагания.

Из соотношений (2) и (3) следует зависимость радиуса стопы от длины шага в виде условия, обеспечивающего допустимое значение $[I_1]$ показателя I_1 :

$$R \geq L \cdot \frac{1 - [I_1]}{2}. \quad (4)$$

Представленная на рис. 3 область допустимых значений для радиуса стопы в зависимости от длины шага ограничена прямой 1.

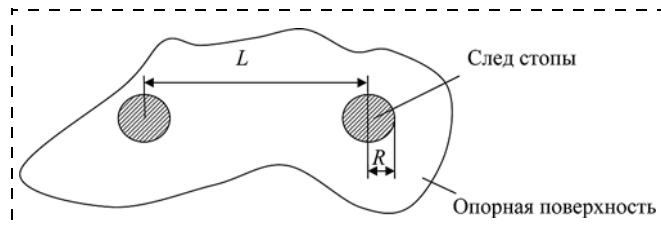


Рис. 2. Фрагмент следовой дорожки механизма шагания (R — радиус стопы, L — длина шага)

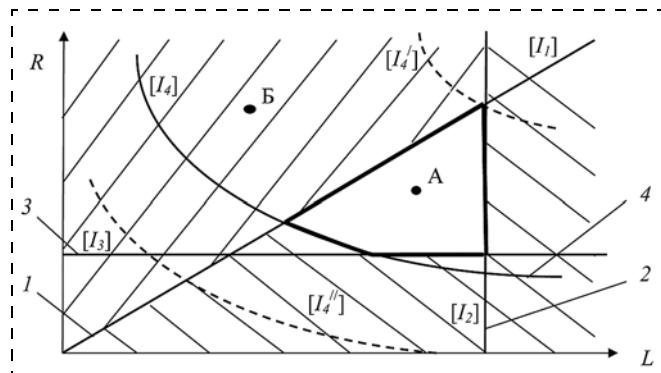


Рис. 3. Область допустимых значений параметров R и L шагающего движителя

Длина шага

Габаритные размеры машины, ход привода курсового движения, неравномерность нормальной нагрузки характеризует показатель I_2 , значение которого принимается прямо пропорциональным длине шага:

$$I_2 = L. \quad (5)$$

Как правило, машина больших габаритных размеров имеет и большую длину шага. Ограничения по размерам, ходу привода курсового движения, неравномерности нормальной нагрузки можно представить в виде полученного из формул (2) и (5) условия обеспечения допустимого значения $[I_2]$ показателя I_2 :

$$L \leq [I_2]. \quad (6)$$

На рис. 3 условию (6) соответствует область допустимых значений исследуемых параметров шагающего движителя, ограниченная прямой 2.

Среднее давление на грунт

Давление σ стопы шагающей машины на грунт, соответствующее значению показателя I_3 , определяется выражением

$$I_3 = \sigma = \frac{G}{\pi R^2}, \quad (7)$$

где G — средняя нормальная нагрузка, приходящаяся на один движитель шагающей машины. Допустимое значение показателя $[I_3]$ равно предельно допустимому давлению стопы движителя на грунт.

Из соотношения (2) с учетом формулы (7) получаем условие

$$R \geq \sqrt{\frac{G}{\pi [I_3]}}, \quad (8)$$

которое определяет соответствие параметров шагающего движителя требованию обеспечения экологичности при взаимодействии стопы с грунтом и повышения коэффициента сцепления. Как известно [8], при меньшем давлении коэффициент сцепления возрастает.

На рис. 3 условию (8) соответствует область значений параметров, ограниченная прямой 3.

Средняя сила сопротивления движению

Для шагающей машины средняя сила сопротивления движению определяется выражением [7, 9]

$$F_{\text{сопр}} = \frac{G^2}{2k\pi LR^2} = fG, \quad (9)$$

где k — коэффициент объемного смятия грунта [8]; f — коэффициент сопротивления движению.

Используя формулу (9), получаем значение коэффициента сопротивления движению, соответствующее частному показателю I_4 :

$$I_4 = f = \frac{G}{2k\pi LR^2}. \quad (10)$$

Из условия (2) с учетом формулы (10) получаем

$$R \geq \sqrt{\frac{G}{2k\pi[I_4]L}}, \quad (11)$$

где $[I_4]$ равно предельному значению коэффициента сопротивления движению. На рис. 3 выражению (11) соответствует область значений параметров R и L , ограниченная кривой 4.

Анализ результатов

Таким образом, полученная область значений параметров R и L ограничена предельно допустимыми значениями показателей I_1, I_2, I_3, I_4 (рис. 3). Расположение границ и форма области могут варьироваться при изменении предельно допустимых значений показателей (например, при изменении типа грунта (штриховые кривые $[I'_4], [I''_4]$ на рис. 3).

При смене грунта, по которому перемещается шагающая машина, возможно отсутствие области допустимых значений параметров R и L . Примером такой ситуации служит вариант, когда кривая $[I'_4]$ пересекает только две прямые 1, 2 из трех прямых 1, 2, 3, соответствующих предельным значениям показателей I_1, I_2, I_3 . Возможны ситуации, когда грунт не влияет на область допустимых параметров (вариант, соответствующий кривой $[I''_4]$).

Выбранная произвольная точка A в области допустимых значений соответствует Парето-оптимальным [10] значениям параметров R и L , так как при любом изменении положения точки A в пределах области допустимых значений хотя бы один показатель будет ухудшаться (расстояние от точки A до границы области допустимых значений, ограниченной предельным значением соответствующего показателя, будет уменьшаться). Так, при перемещении точки A перпендикулярно к прямой 1 увеличится длина шага и уменьшится давление стопы на грунт, но в худшую сторону возрастет значение сопротивления движению. При перемещении точки A перпендикулярно к прямой 2 увеличится радиус стопы и давление стопы на грунт, но сократится значение сопротивления движению. Двигаясь перпендикулярно к прямой 3, получим уменьшение радиуса стопы, давления стопы на грунт и значения сопротивления движению.

Также возможно попадание полученных значений за пределы допустимой области (точка Б). В этом случае полученные значения параметров следует считать недопустимыми.

Заключение

Полученная область ограничивается предельными значениями показателей критериев качества шагающей машины, определяя допустимые значения параметров шагающего движителя: размеров стопы и длины шага шагающей машины. Вместе с тем, предложенный метод может применяться и для выбора конструктивных параметров других технических узлов.

Таким образом, показатели качества формируют область допустимых параметров шагающего движителя и позволяют на этапе проектного расчета определить условия, при которых конструкция транспортного средства будет соответствовать решению поставленных задач.

Список литературы

- Брискин Е. С., Чернышев В. В., Малолетов А. В., Шаронов Н. Г. Сравнительный анализ колесных, гусеничных и шагающих машин // Робототехника и техническая кибернетика. 2013. № 1. С. 6–14.
- Брискин Е. С., Чернышев В. В., Жога В. В., Малолетов А. В., Шаронов Н. Г., Фролова Н. Е. Концепция проектирования, динамика и управление движением шагающих машин. Ч. 3. Алгоритмы управления движением шагающих машин серии "Восьминог" и экспериментальные исследования // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 7. С. 13–18.
- Брискин Е. С., Вершинина И. П., Малолетов А. В., Шаронов Н. Г. Об управлении движением шагающей машины со сдвоенными ортогонально-поворотными движителями // Известия РАН. Теория и системы управления. 2014. № 3. С. 168–176.
- Шурыгин В. А., Серов В. А., Шаронов Н. Г. Моделирование движения шагающей машины с ортогонально-поворотными движителями // Изв. ВолгГТУ. Сер. "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". 2011. Вып. 11. № 9. С. 41–44.
- Брискин Е. С., Калинин Я. В., Леонард А. В., Малолетов А. В. О прикладных экстремальных задачах с комплексным критерием качества // Сб. матер. XII Всеросс. совещания по проблемам управления ВСПУ-2014, ИПУ РАН, Москва. 2014. С. 2184–2195.
- Брискин Е. С., Жога В. В., Чернышев В. В., Малолетов А. В. Динамика и управление движением шагающих машин с цикловыми движителями. М.: Машиностроение, 2009. 191 с.
- Игнатьев М. Б., Кулаков Ф. М., Покровский А. М. Алгоритмы управления роботами-манипуляторами. Л.: Машиностроение, 1972. 248 с.
- Гуськов В. В., Велев Н. Н., Атаманов Ю. Е. и др. Тракторы: Теория. М.: Машиностроение, 1988. 375 с.
- Брискин Е. С., Соболев В. М. Тяговая динамика шагающих машин с ортогональными движителями // Проблемы машиностроения. 1990. № 3. С. 28–34.
- Соболь И. М., Статников Р. Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Дрофа, 2006. 176 с.

Definition of the Admissible Parameters of the Walking Robots' Movers

E. S. Briskin¹, dtm@vstu.ru, V. A. Serov², S. S. Fomenko¹, N. G. Sharonov¹, V. A. Shurygin¹,

¹ Volgograd State Technical University, Volgograd, 400005, Russian Federation

² TsKB Titan Co., Volgograd, 400071, Russian Federation

Received on February 20, 2015

Unlike the wheeled and tracked propulsion systems, the walking movers have not yet acquired common design features. Therefore, designers of new walking machines encounter multicriterion tasks. The authors consider definition of the admissible parameters of the walking robots' movers. Step length and area of the bearing surface of the foot are the main parameters of a walking mover. The quality of the design of a walking machine and control of its movement can be evaluated by particular quality indicators of the relative area of the contactless overcome obstacles, step length, average ground pressure, and moderate resistance to the movement. A comprehensive analysis of particular quality indicators will make it possible to obtain a compromise solution. The set task is determination of the parameter values of a walking machine in the form of the dependence of the radius of the round foot of the walking mechanism on the step length, ensuring admissible values of the particular indicators. If the conditions for each of the particular indicators are met, the admissible values of the indicators will be ensured. On the basis of the indicators, characterizing the quality of the walking robots, in the parameter space of the movers an area is built, ensuring the admissible values of the indicators. The obtained area is restricted by the limiting value of the quality criteria indicators of a walking machine, determining the admissible values of a walking mover: foot size and step length of a walking machine. The location of the boundaries and the shape of the area may vary with a change of the limiting values of the indicators. Thus, the quality indicators form the area of the admissible parameters of a walking mover. The proposed method makes it possible to select the desired parameters of a mover at the design stage. It was used in the development of Ortonog walking machine.

Keywords: walking machine, quality indicator, walking movers, foot, area of valid parameters

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 14-08-01002 a, 14-08-97041 r_povolzh'e_a

For citation:

Briskin E. S., Serov V. A., Fomenko S. S., Sharonov N. G., Shurygin V. A. Definition of the Admissible Parameters of the Walking Robots' Movers, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 6, pp. 369–372.

DOI: 10.17587/mau.16.369-372

References

1. Briskin E. S., Chernyshev V. V., Maloletov A. V., Sharonov N. G. *Sravnitel'nyi analiz kolesnykh, gusenichnykh i shagayushchikh mashin* (Comparative analysis of wheeled, tracked and legged machines), *Robototekhnika i Tekhnicheskaya Kibernetika*, 2013, no. 1, pp. 6–14 (in Russian).
2. Briskin E. S., Chernyshev V. V., Zhoga V. V., Maloletov A. V., Sharonov N. G., Frolova N. E. *Konseptsiya proektirovaniya, dinamika i upravlenie dvizheniem shagayushchikh mashin. Ch. 3. Algoritmy upravleniya dvizheniem shagayushchikh mashin serii "Vos'minog" i eksperimental'nye issledovaniya* (Concept design, dynamics and motion control of walking machines. Ch. 3. Algorithms for motion control of walking machines series "the Octopus" and experimental studies), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2005, no. 7, pp. 13–18 (in Russian).
3. Briskin E. S., Vershinina I. P., Maloletov A. V., Sharonov N. G. *Ob upravlenii dvizheniem shagayushchey mashiny so sdvoennymi ortogonal'no-povorotnymi dvizhitelyami* (About the motion control walking machine with dual orthogonal-rotating propellers), *Izvestiya RAN. Teoriya i Sistemy Upravleniya*, 2014, no. 3, pp. 168–176 (in Russian).
4. Shurygin V. A., Serov V. A., Sharonov N. G. *Modelirovaniye dvizheniya shagayushchey mashiny s ortogonal'no-povorotnymi dvizhitelyami* (Modeling the movement of a walking machine with orthogonal-rotating propellers), *Izv. VolgGTU. Ser. "Aktual'nye Problemy Upravleniya, Vychislitel'noi Tekhniki i Informatiki v Tekhnicheskikh Sistemakh"*, 2011, iss. 11, no. 9, pp. 41–44 (in Russian).
5. Briskin E. S., Kalinin Ya. V., Leonard A. V., Maloletov A. V. *O prikladnykh ekstremal'nykh zadachakh s kompleksnym kriterием kachestva* (About applied extreme problems with complex quality criteria), *Sbornik Materialov XII Vseross. Soveshchaniya po Problemam Upravleniya VSPU-2014*, IPU RAN, Moskva. 2014. S. 2184–2195 (in Russian).
6. Briskin E. S., Zhoga V. V., Chernyshev V. V., Maloletov A. V. *Dinamika i upravlenie dvizheniem shagayushchikh mashin s tsiklovymi dvizhitelyami: monografiya* (Dynamics and motion control of walking machines with cyclic walking propellers: monograph), Moscow, Mashinostroenie, 2009, 191 p. (in Russian).
7. Ignat'ev M. B., Kulakov F. M., Pokrovskii A. M. *Algoritmy upravleniya robotami-manipulyatorami* (Algorithms for control of robotic manipulators), Leningrad, Mashinostroenie, 1972, 248 p. (in Russian).
8. Gus'kov V. V., Velev N. N., Atamanov Yu. E., Bocharov N. F., Ksenovich I. P., Solonskii A. S. *Traktory: Teoriya* (Tractors: Theory), Moscow, Mashinostroenie, 1988, 375 p. (in Russian).
9. Briskin E. S., Sobolev V. M. *Tyagovaya dinamika shagayushchikh mashin s ortogonal'nymi dvizhitelyami* (Traction dynamics of walking machines orthogonal-propulsion systems), *Problemy Mashinostroeniya*, 1990, no. 3, pp. 28–34. (in Russian).
10. Sobol' I. M., Statnikov R. B. *Vybor optimal'nykh parametrov v zadachakh so mnogimi kriteriyami* (Selection of optimal parameters in problems with many criteria), Moscow, Drofa, 2006, 176 p. (in Russian).

Corresponding author:

E. S. Briskin, D. Sc., Professor, Head of Chair, Volgograd State Technical University, Volgograd, 400005, Russian Federation, e-mail: dtm@vstu.ru

Е. И. Нелаева, аспирант, LomovtsevaEl@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 манипулятора. Часть 1¹

На примере стэнфордского манипулятора рассматривается методология решения прямой задачи кинематики роботов-манипуляторов с использованием дуальных матриц направляющих косинусов и параболических бикватернионов Клиффорда, выводятся кинематические уравнения движения манипулятора, рассматривается методология решения обратной задачи кинематики с использованием бикватернионной теории кинематического управления. В статье развиваются и дополняются результаты, полученные в работе [1, 2].

Ключевые слова: робот-манипулятор, прямая задача кинематики, матрица дуальных направляющих косинусов, бикватернион, кинематические уравнения, обратная задача кинематики

Введение

Прямая задача кинематики роботов-манипуляторов заключается в определении углового и линейного местоположения схвата манипулятора по известным обобщенным координатам робота-манипулятора. В статье рассматривается решение этой задачи с использованием дуальных матриц направляющих косинусов и параболических бикватернионов Клиффорда.

Обратная задача кинематики роботов-манипуляторов заключается в определении обобщенных координат робота-манипулятора по известному угловому и линейному местоположению схвата манипулятора. В статье развивается новый метод решения обратных задач кинематики роботов-манипуляторов [3], основанный на применении бикватернионной теории управления движением свободного твердого тела по принципу обратной связи в кинематической постановке. Достоинства используемого метода: единственность решения (если оно существует) для выбранного закона кинематического управления и заданного начального состояния манипулятора, высокая точность решения и высокое быстродействие, а также тот факт, что этот метод, в отличие от других известных, является неитерационным.

1. Кинематическая схема и системы координат

Стэнфордский манипулятор [4] представляет собой манипулятор с шестью степенями свободы: пятью вращательными и одной поступательной. Схема манипулятора приведена на рис. 1. Введем следующие системы координат: $x_0y_0z_0$ с началом в точке O_0 — система координат, связанная с основанием манипулятора; $x_iy_iz_i$ с началом в точке O_i — система координат, связанная с i -м звеном мани-

пулятора, ось z_i которой направлена вдоль оси i -го сочленения; ось x_i перпендикулярна оси z_{i-1} , ось y_i дополняет оси x_i , z_i до правой декартовой системы координат.

Относительное положение звеньев стэнфордского манипулятора может быть описано с помощью трех соответствующих каждому звену конструктивных геометрических параметров θ_i , α_i , d_i , приведенных в таблице [4].

В таблице θ_i — присоединенный угол (угол, на который надо повернуть ось x_{i-1} вокруг оси z_{i-1} , чтобы она стала сонаправлена с осью x_i); d_i — рас-

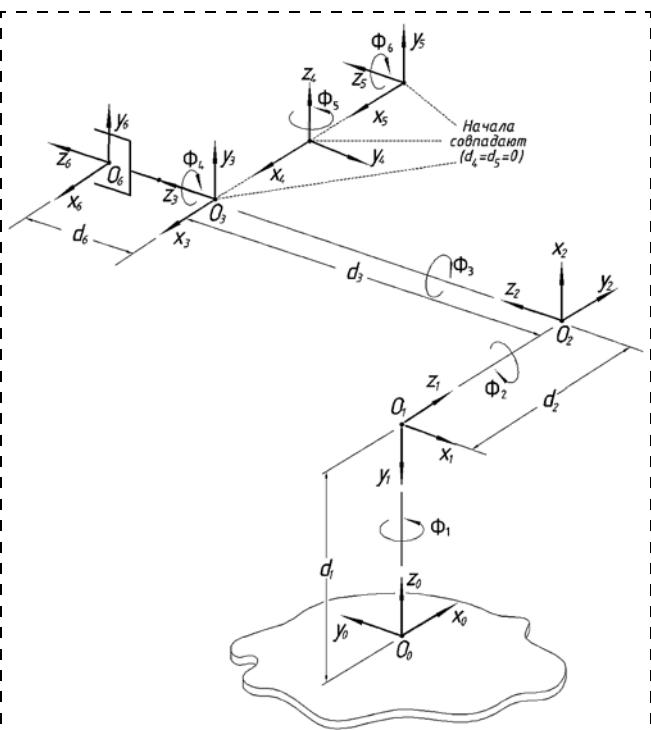


Рис. 1. Схема стэнфордского манипулятора

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-01-00165).

Параметры звеньев стэнфордского манипулятора

Сочленение i	θ_i	α_i	d_i
1	-90°	-90°	d_1
2	-90°	90°	d_2
3	-90°	0°	d_3
4	0°	-90°	0
5	0°	90°	0
6	0°	0°	d_6

стояние между пересечением оси z_{i-1} с осью x_i и началом ($i-1$)-й системы координат, отсчитываемое вдоль оси z_{i-1} ; d_1, d_2, d_6 — постоянные величины, d_3 — переменная величина; α_i — угловое смещение (угол, на который надо повернуть ось z_{i-1} вокруг оси x_i , чтобы она стала сонаправлена с осью z_i).

В качестве обобщенных координат манипулятора выступают углы φ_i ($i = 1, 2, 4, 5, 6$) поворота i -го звена относительно ($i-1$)-го вокруг оси z_{i-1} и обобщенная координата d_3 , определяющая поступательное перемещение третьего звена относительно второго вдоль оси $z_2(z_3)$. Отметим, что обобщенные координаты φ_i отсчитываются вокруг тех же осей, что и конструктивные параметры θ_i . На рис. 1 $\Phi_i = \theta_i + \varphi_i$.

2. Решение прямой задачи кинематики с использованием матриц дуальных направляющих косинусов и бикватернионов конечных перемещений

Прямая задача кинематики состоит в определении линейного положения и ориентации выходного звена (схватка) манипулятора относительно абсолютной системы координат $x_0y_0z_0$ по известному вектору обобщенных координат $q(t) = q_1(t), q_2(t), \dots, q_6(t) = (\varphi_1(t), \varphi_2(t), d_3(t), \varphi_4(t), \varphi_5(t), \varphi_6(t))$ и заданным геометрическим параметрам звеньев.

Для решения прямой задачи кинематики нами используется следующая схема конечных перемещений звеньев манипулятора:

$$\begin{aligned} x_0y_0z_0 &\xrightarrow{\mathbf{C}_1, \Lambda_1} x_1y_1z_1 \xrightarrow{\mathbf{C}_2, \Lambda_2} x_2y_2z_2 \xrightarrow{\mathbf{C}_3, \Lambda_3} \\ &\xrightarrow{\mathbf{C}_3, \Lambda_3} x_3y_3z_3 \xrightarrow{\mathbf{C}_4, \Lambda_4} x_4y_4z_4 \xrightarrow{\mathbf{C}_5, \Lambda_5} \\ &\xrightarrow{\mathbf{C}_5, \Lambda_5} x_5y_5z_5 \xrightarrow{\mathbf{C}_6, \Lambda_6} x_6y_6z_6, \\ x_0y_0z_0 &\xrightarrow{\mathbf{C}, \Lambda} x_6y_6z_6. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь \mathbf{C}_i и Λ_i — матрица дуальных направляющих косинусов и бикватернион конечного перемещения i -го звена манипулятора относительно ($i-1$)-го, \mathbf{C} и Λ — матрица дуальных направляющих косинусов и бикватернион конечного перемещения выходного звена манипулятора относительно основания соответственно.

Нахождение матрицы \mathbf{C} и бикватерниона Λ в виде функций обобщенных координат манипулятора с помощью формул сложения конечных пере-

мещений [5] и составляет предмет решения прямой задачи кинематики.

Конечное перемещение выходного звена манипулятора (системы координат $x_6y_6z_6$) относительно основания (системы координат $x_0y_0z_0$) является композицией относительных конечных перемещений звеньев манипулятора. В соответствии со схемой конечных перемещений (1) и формулой сложения конечных перемещений [5] уравнения для нахождения матрицы \mathbf{C} и бикватерниона Λ можно представить в следующем виде:

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}_6 \mathbf{C}_5 \mathbf{C}_4 \mathbf{C}_3 \mathbf{C}_2 \mathbf{C}_1, \quad (2)$$

$$\Lambda = \Lambda_1 \circ \Lambda_2 \circ \Lambda_3 \circ \Lambda_4 \circ \Lambda_5 \circ \Lambda_6. \quad (3)$$

Здесь и далее \circ — символ кватернионного (или бикватернионного) умножения.

В свою очередь, каждое из относительных конечных перемещений звеньев (конечное перемещение i -го звена относительно ($i-1$)-го, описываемое матрицей \mathbf{C}_i или бикватернионом Λ_i) представляет собой композицию двух перемещений: перемещения на дуальный угол $\Phi_i + sd_i = \theta_i + \varphi_i + sd_i$ вокруг оси z_{i-1} (рис. 2) и поворота на угол α_i вокруг оси x'_i , полученной из оси x_{i-1} в результате первого перемещения (рис. 3). Здесь s — символ (комплексность) Клиффорда, обладающая свойством $s^2 = 0$.

Схема конечных перемещений имеет следующий вид:

$$x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1} \xrightarrow{\mathbf{C}_i^1, \Lambda_i^1} x'_iy'_iz'_i \xrightarrow{\mathbf{C}_i^2, \Lambda_i^2} x_iy_iz_i.$$

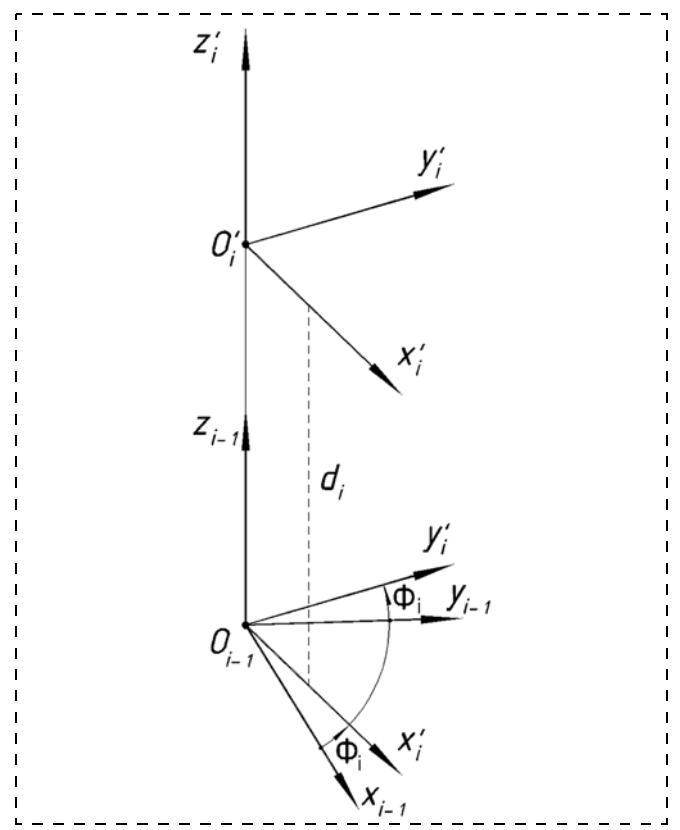


Рис. 2. Первое перемещение i -го звена относительно ($i-1$)-го

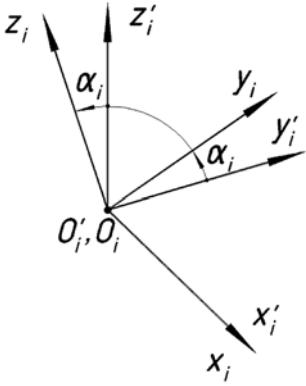


Рис. 3. Второе перемещение i -го звена относительно $(i-1)$ -го

Матрица дуальных направляющих косинусов \mathbf{C}_i^1 и бикватернион Λ_i^1 первого перемещения i -го звена относительно $(i-1)$ -го в соответствии с выбранной кинематической схемой и соотношениями между параметрами Эйлера и проекциями винта конечного перемещения на оси системы координат $x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}$ и $x'_iy'_iz'_i$ имеют вид [5]

$$\mathbf{C}_i^1 = \begin{pmatrix} \cos((\theta_i + \varphi_i) + sd_i) & \sin(\theta_i + \varphi_i) + sd_i & 0 \\ -\sin(\theta_i + \varphi_i) + sd_i & \cos((\theta_i + \varphi_i) + sd_i) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$\Lambda_i^1 = \cos\left(\frac{\theta_i + \varphi_i}{2} + s\frac{d_i}{2}\right) + \sin\left(\frac{\theta_i + \varphi_i}{2} + s\frac{d_i}{2}\right)\mathbf{i}_3.$$

Здесь и далее $\mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2, \mathbf{i}_3$ — векторные мнимые единицы Гамильтона.

Второе конструктивное перемещение i -го звена относительно $(i-1)$ -го представляет собой поворот на угол α_i вокруг оси x'_i , линейная составляющая перемещения отсутствует. Матрица дуальных направляющих косинусов и бикватернион перемещения для этого случая совпадают с матрицей вещественных направляющих косинусов и кватернионом поворота и имеют вид

$$\mathbf{C}_i^2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & \sin\alpha_i \\ 0 & -\sin\alpha_i & \cos\alpha_i \end{pmatrix};$$

$$\Lambda_i^2 = \lambda_i^2 = \cos\frac{\alpha_i}{2} + \sin\frac{\alpha_i}{2}\mathbf{i}_1.$$

Матрица дуальных направляющих косинусов и бикватернион конечного перемещения i -го звена манипулятора относительно $(i-1)$ -го находятся с использованием формул сложения конечных перемещений [5]:

$$\mathbf{C}_i = \mathbf{C}_i^2 \mathbf{C}_i^1 = \\ = \begin{pmatrix} \cos((\theta_i + \varphi_i) + sd_i) & \sin(\theta_i + \varphi_i) + sd_i & 0 \\ -\cos\alpha_i \sin((\theta_i + \varphi_i) + sd_i) & \cos\alpha_i \cos((\theta_i + \varphi_i) + sd_i) & \sin\alpha_i \\ \sin\alpha_i \sin((\theta_i + \varphi_i) + sd_i) & -\sin\alpha_i \cos((\theta_i + \varphi_i) + sd_i) & \cos\alpha_i \end{pmatrix}; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Lambda_i = \Lambda_i^1 \circ \Lambda_i^2 &= \cos\frac{\alpha_i}{2} \cos\left(\frac{\theta_i + \varphi_i}{2} + s\frac{d_i}{2}\right) + \\ &+ \sin\frac{\alpha_i}{2} \cos\left(\frac{\theta_i + \varphi_i}{2} + s\frac{d_i}{2}\right)\mathbf{i}_1 + \\ &+ \sin\frac{\alpha_i}{2} \sin\left(\frac{\theta_i + \varphi_i}{2} + s\frac{d_i}{2}\right)\mathbf{i}_2 + \\ &+ \cos\frac{\alpha_i}{2} \sin\left(\frac{\theta_i + \varphi_i}{2} + s\frac{d_i}{2}\right)\mathbf{i}_3. \end{aligned} \quad (5)$$

При подстановке в уравнения (4), (5) геометрических параметров манипулятора, приведенных в таблице, можно получить матрицы дуальных направляющих косинусов и бикватернионы относительных конечных перемещений звеньев манипулятора в явном виде.

Матрица дуальных направляющих косинусов \mathbf{C} и бикватернион конечного перемещения Λ выходного звена манипулятора относительно неподвижного основания находятся через приведенные матрицы и бикватернионы по формулам (2), (3). Алгоритм решения прямой задачи кинематики являются формулы (2), (3) при подстановке в них соотношений (4), (5) и заданных геометрических параметров звеньев.

3. Кинематические уравнения движения

Кинематические уравнения движения манипулятора могут быть получены из векторных выражений для линейной и угловой скоростей движения выходного звена манипулятора путем проектирования их на оси системы координат $x_6y_6z_6$, связанной с выходным звеном манипулятора.

В соответствии с кинематической схемой (см. рис. 1) вектор ω угловой скорости выходного звена манипулятора можно представить в виде

$$\omega = \dot{q}_1 \mathbf{k}_0 + \dot{q}_2 \mathbf{k}_1 + \dot{q}_3 \mathbf{k}_2 + \dot{q}_4 \mathbf{k}_3 + \dot{q}_5 \mathbf{k}_4 + \dot{q}_6 \mathbf{k}_5. \quad (6)$$

Здесь \mathbf{k}_i — орт оси z_i системы координат, связанной с i -м звеном манипулятора, верхняя точка обозначает производную по времени.

Радиус-вектор \mathbf{r} начала O_6 системы координат, связанной с выходным звеном, в соответствии с кинематической схемой (см. рис. 1) определяется соотношением

$$\begin{aligned} \mathbf{r} = \overrightarrow{O_0O_1} + \overrightarrow{O_1O_2} + \overrightarrow{O_2O_3} + \\ + \overrightarrow{O_3O_4} + \overrightarrow{O_4O_5} + \overrightarrow{O_5O_6}, \end{aligned} \quad (7)$$

где O_0 — начало системы координат, связанной с основанием манипулятора, O_i — начало i -й системы координат.

Дифференцирование уравнения (7) по времени и подстановка в него заданных геометрических параметров манипулятора, приведенных в таблице, дает выражение для вектора линейной скорости начала

системы координат $x_6y_6z_6$, связанной с выходным звеном, относительно неподвижного основания:

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{d}_1}{dt} + \frac{d\mathbf{d}_2}{dt} + \frac{d\mathbf{d}_3}{dt} + \frac{d\mathbf{d}_6}{dt}; \mathbf{d}_l = d\mathbf{k}_l.$$

Векторы $\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \mathbf{d}_6$ постоянны по модулю, поэтому использование формулы Эйлера для постоянного по модулю вектора и дифференцирование переменного вектора \mathbf{d}_3 дает следующее выражение:

$$\mathbf{v} = \boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{d}_1 + (\boldsymbol{\omega}_1 + \boldsymbol{\omega}_2) \times \mathbf{d}_2 + d_3 \mathbf{k}_3 + (\boldsymbol{\omega}_1 + \boldsymbol{\omega}_2) \times (d_3 \mathbf{k}_2) + (\boldsymbol{\omega}_1 + \boldsymbol{\omega}_2 + \boldsymbol{\omega}_4 + \boldsymbol{\omega}_5 + \boldsymbol{\omega}_6) \times \mathbf{d}_6, \quad (8)$$

где \times — символ векторного произведения, $\boldsymbol{\omega}_i$ — относительные угловые скорости звеньев, которые выражаются через обобщенные координаты и орты осей z_i следующим образом: $\boldsymbol{\omega}_i = \dot{\phi}_i \mathbf{k}_{i-1}$, $i = 1, 2, 4, 5, 6$.

Для получения кинематических уравнений необходимо спроектировать векторные выражения (6) и (8) на оси системы координат $x_6y_6z_6$, связанной с выходным звеном манипулятора. Необходимые для проектирования вещественные матрицы направляющих косинусов обозначим следующим образом:

$$\mathbf{c} = \mathbf{c}_6 \mathbf{c}_5 \mathbf{c}_4 \mathbf{c}_3 \mathbf{c}_2 \mathbf{c}_1, \mathbf{c}_{61} = \mathbf{c}_6 \mathbf{c}_5 \mathbf{c}_4 \mathbf{c}_3 \mathbf{c}_2, \mathbf{c}_{62} = \mathbf{c}_6 \mathbf{c}_5 \mathbf{c}_4 \mathbf{c}_3, \\ \mathbf{c}_{63} = \mathbf{c}_6 \mathbf{c}_5 \mathbf{c}_4, \mathbf{c}_{64} = \mathbf{c}_6 \mathbf{c}_5, \mathbf{c}_{65} = \mathbf{c}_6.$$

Здесь \mathbf{c}_i — вещественная матрица направляющих косинусов поворота i -го звена манипулятора относительно $(i-1)$ -го. Тогда переход от одной системы координат к другой, учитывающий лишь повороты систем координат, осуществляется в соответствии со следующей схемой поворотов:

$$x_0y_0z_0 \xrightarrow{\mathbf{c}} x_6y_6z_6; x_1y_1z_1 \xrightarrow{\mathbf{c}_{61}} x_6y_6z_6; \\ x_2y_2z_2 \xrightarrow{\mathbf{c}_{62}} x_6y_6z_6; x_3y_3z_3 \xrightarrow{\mathbf{c}_{63}} x_6y_6z_6; \\ x_4y_4z_4 \xrightarrow{\mathbf{c}_{64}} x_6y_6z_6; x_5y_5z_5 \xrightarrow{\mathbf{c}_{65}} x_6y_6z_6.$$

Найдем проекции единичных векторов \mathbf{k}_i на оси системы координат $x_6y_6z_6$, связанной с выходным звеном. Обозначим c^{ij} и c_{6k}^{ij} ($i, j = 1, 2, 3; k = 1, 2, 3, 4, 5$) элементы матриц \mathbf{c} и \mathbf{c}_{6k} , а $\mathbf{i}_6, \mathbf{j}_6, \mathbf{k}_6$ — орты системы координат $x_6y_6z_6$. Имеем:

$$\mathbf{k}_0 = c^{13} \mathbf{i}_6 + c^{23} \mathbf{j}_6 + c^{33} \mathbf{k}_6, \mathbf{k}_i = c_{6i}^{13} \mathbf{i}_6 + c_{6i}^{23} \mathbf{j}_6 + c_{6i}^{33} \mathbf{k}_6; \\ i = 1, 2, 3, 4, 5. \quad (9)$$

Запишем векторное уравнение (6) в матричном виде, учитывая соотношения (9) и обозначая $\boldsymbol{\omega}_1, \boldsymbol{\omega}_2, \boldsymbol{\omega}_3$ проекции вектора $\boldsymbol{\omega}$ на оси системы координат $x_6y_6z_6$. Получим:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega}_1 \\ \boldsymbol{\omega}_2 \\ \boldsymbol{\omega}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 c^{13} + \dot{\phi}_2 c_{61}^{13} + \dot{\phi}_4 c_{63}^{13} + \dot{\phi}_5 c_{64}^{13} + \dot{\phi}_6 c_{65}^{13} \\ \dot{\phi}_1 c^{23} + \dot{\phi}_2 c_{61}^{23} + \dot{\phi}_4 c_{63}^{23} + \dot{\phi}_5 c_{64}^{23} + \dot{\phi}_6 c_{65}^{23} \\ \dot{\phi}_1 c^{33} + \dot{\phi}_2 c_{61}^{33} + \dot{\phi}_4 c_{63}^{33} + \dot{\phi}_5 c_{64}^{33} + \dot{\phi}_6 c_{65}^{33} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Найдем проекции векторов \mathbf{d}_i на оси системы координат $x_6y_6z_6$, связанной с выходным звеном. Имеем:

$$\mathbf{d}_1 = d_1 c^{13} \mathbf{i}_6 + d_1 c^{23} \mathbf{j}_6 + d_1 c^{33} \mathbf{k}_6; \\ \mathbf{d}_i = d_i c_{6(i-1)}^{13} \mathbf{i}_6 + d_i c_{6(i-1)}^{23} \mathbf{j}_6 + d_i c_{6(i-1)}^{33} \mathbf{k}_6; \\ i = 2, 3, 6. \quad (11)$$

Проектирование векторного уравнения (8) на оси системы координат $x_6y_6z_6$ с учетом соотношений (9), (11) дает три скалярных уравнения для компонент v_i вектора \mathbf{v} линейной скорости выходного звена манипулятора относительно основания в системе координат $x_0y_0z_0$, имеющих вид

$$v_1 = d_2 \dot{\phi}_1 (c^{23} c_{61}^{33} - c^{33} c_{61}^{23}) + \dot{d}_3 c_{62}^{13} + \\ + d_3 \dot{\phi}_1 (c^{23} c_{62}^{33} - c^{33} c_{62}^{23}) + d_3 \dot{\phi}_2 (c_{61}^{23} c_{62}^{33} - c_{61}^{33} c_{62}^{23}) + \\ + d_6 \dot{\phi}_1 (c^{23} c_{65}^{33} - c^{33} c_{65}^{23}) + d_6 \dot{\phi}_2 (c_{61}^{23} c_{65}^{33} - c_{61}^{33} c_{65}^{23}) + \\ + d_6 \dot{\phi}_4 (c_{63}^{23} c_{65}^{33} - c_{63}^{33} c_{65}^{23}) + d_6 \dot{\phi}_5 (c_{64}^{23} c_{65}^{33} - c_{64}^{33} c_{65}^{23}); \\ v_2 = -(d_2 \dot{\phi}_1 (c^{13} c_{61}^{33} - c^{33} c_{61}^{13}) + \dot{d}_3 c_{62}^{23} + \\ + d_3 \dot{\phi}_1 (c^{13} c_{62}^{33} - c^{33} c_{62}^{13}) + d_3 \dot{\phi}_2 (c_{61}^{13} c_{62}^{33} - c_{61}^{33} c_{62}^{13}) + \\ + d_6 \dot{\phi}_1 (c^{13} c_{65}^{33} - c^{33} c_{65}^{13}) + d_6 \dot{\phi}_2 (c_{61}^{13} c_{65}^{33} - c_{61}^{33} c_{65}^{13}) + \\ + d_6 \dot{\phi}_4 (c_{63}^{13} c_{65}^{33} - c_{63}^{33} c_{65}^{13}) + d_6 \dot{\phi}_5 (c_{64}^{13} c_{65}^{33} - c_{64}^{33} c_{65}^{13})); \\ v_3 = d_2 \dot{\phi}_1 (c^{13} c_{61}^{23} - c^{23} c_{61}^{13}) + \dot{d}_3 c_{62}^{33} + \\ + d_3 \dot{\phi}_1 (c^{13} c_{62}^{23} - c^{23} c_{62}^{13}) + d_3 \dot{\phi}_2 (c_{61}^{13} c_{62}^{23} - c_{61}^{23} c_{62}^{13}) + \\ + d_6 \dot{\phi}_1 (c^{13} c_{65}^{23} - c^{23} c_{65}^{13}) + d_6 \dot{\phi}_2 (c_{61}^{13} c_{65}^{23} - c_{61}^{23} c_{65}^{13}) + \\ + d_6 \dot{\phi}_4 (c_{63}^{13} c_{65}^{23} - c_{63}^{23} c_{65}^{13}) + d_6 \dot{\phi}_5 (c_{64}^{13} c_{65}^{23} - c_{64}^{23} c_{65}^{13}). \quad (12)$$

Объединим соотношения (10) и (12) и введем обозначения

$$\mathbf{A} = \|a_{ij}\|, \quad (13)$$

где

$$a_{11} = c^{13}, a_{12} = c_{61}^{13}, a_{13} = 0, a_{14} = c_{63}^{13}, a_{15} = c_{64}^{13}, \\ a_{16} = c_{65}^{13}, a_{21} = c^{23}, a_{22} = c_{61}^{23}, a_{23} = 0, a_{24} = c_{63}^{23}, \\ a_{25} = c_{64}^{23}, a_{26} = c_{65}^{23}, a_{31} = c^{33}, a_{32} = c_{61}^{33}, a_{33} = 0, \\ a_{34} = c_{63}^{33}, a_{35} = c_{64}^{33}, a_{36} = c_{65}^{33}, \\ a_{41} = d_2 (c^{23} c_{61}^{33} - c^{33} c_{61}^{23}) + d_3 (c^{23} c_{62}^{33} - c^{33} c_{62}^{23}) + \\ + d_6 (c^{23} c_{65}^{33} - c^{33} c_{65}^{23}), \\ a_{42} = d_3 (c_{61}^{23} c_{62}^{33} - c_{61}^{33} c_{62}^{23}) + d_6 (c_{61}^{23} c_{65}^{33} - c_{61}^{33} c_{65}^{23}), \\ a_{43} = c_{62}^{13}, a_{44} = d_6 (c_{63}^{23} c_{65}^{33} - c_{63}^{33} c_{65}^{23}), \\ a_{45} = d_6 (c_{64}^{23} c_{65}^{33} - c_{64}^{33} c_{65}^{23}), a_{46} = 0,$$

$$\begin{aligned}
a_{51} &= -d_2(c^{13}c_{61}^{33} - c^{33}c_{61}^{13}) - d_3(c^{13}c_{62}^{33} - c^{33}c_{62}^{13}) - \\
&- d_6(c^{13}c_{65}^{33} - c^{33}c_{65}^{13}), \\
a_{52} &= -d_3(c_{61}^{13}c_{62}^{33} - c_{61}^{33}c_{62}^{13}) - d_6(c_{61}^{13}c_{65}^{33} - c_{61}^{33}c_{65}^{13}), \\
a_{53} &= c_{62}^{23}, \quad a_{54} = -d_6(c_{63}^{13}c_{65}^{33} - c_{63}^{33}c_{65}^{13}), \\
a_{55} &= -d_6(c_{64}^{13}c_{65}^{33} - c_{64}^{33}c_{65}^{13}), \quad a_{56} = 0, \\
a_{61} &= d_2(c^{13}c_{61}^{23} - c^{23}c_{61}^{13}) + d_3(c^{13}c_{62}^{23} - c^{23}c_{62}^{13}) + \\
&+ d_6(c^{13}c_{65}^{23} - c^{23}c_{65}^{13}), \\
a_{62} &= d_3(c_{61}^{13}c_{62}^{23} - c_{61}^{23}c_{62}^{13}) + d_6(c_{61}^{13}c_{65}^{23} - c_{61}^{23}c_{65}^{13}), \\
a_{63} &= c_{62}^{33}, \quad a_{64} = d_6(c_{63}^{13}c_{65}^{23} - c_{63}^{23}c_{65}^{13}), \\
a_{65} &= d_6(c_{64}^{13}c_{65}^{23} - c_{64}^{23}c_{65}^{13}), \quad a_{66} = 0.
\end{aligned}$$

С учетом обозначения (13) получим матричное уравнение

$$(\dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 \dot{d}_3 \dot{\varphi}_4 \dot{\varphi}_5 \dot{\varphi}_6)^T = \mathbf{A}^{-1}(\omega_1 \omega_2 \omega_3 v_1 v_2 v_3)^T, \quad (14)$$

где T — символ транспонирования.

Полученные уравнения (14), (13) — кинематические уравнения движения стэндфордского робота-манипулятора. Они представляют собой систему из шести нелинейных нестационарных обыкновенных дифференциальных уравнений относительно переменных $\varphi_1, \varphi_2, d_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6$, являющихся обобщенными координатами манипулятора.

4. Решение обратной задачи кинематики стэндфордского манипулятора

Введем в рассмотрение опорную (программную) систему координат $x_{pr}y_{pr}z_{pr}$, задающую требуемое конечное положение схвата робота-манипулятора.

Взаимное положение систем координат зададим нормированными бикватернионами $\mathbf{N} = \mathbf{v} + s\mathbf{v}^0, \mathbf{M} = \boldsymbol{\mu} + s\boldsymbol{\mu}^0$ (или $\mathbf{M}^* = \boldsymbol{\mu}^* + s\boldsymbol{\mu}^{0*}$), $\Lambda = \boldsymbol{\lambda} + s\boldsymbol{\lambda}^0$ конечных перемещений в соответствии со следующей схемой перемещений:

$$\begin{aligned}
x_0y_0z_0 &\xrightarrow{\mathbf{N}} x_{pr}y_{pr}z_{pr} \xrightarrow{\mathbf{M}(\mathbf{M}^*)} x_6y_6z_6; \\
x_0y_0z_0 &\xrightarrow{\Lambda} x_6y_6z_6,
\end{aligned} \quad (15)$$

$$\mathbf{N} = N_0 + N_1\mathbf{i}_1 + N_2\mathbf{i}_2 + N_3\mathbf{i}_3 = \mathbf{v} + s\mathbf{v}^0;$$

$$\mathbf{M} = M_0 + M_1\mathbf{i}_1 + M_2\mathbf{i}_2 + M_3\mathbf{i}_3 = \boldsymbol{\mu} + s\boldsymbol{\mu}^0;$$

$$\mathbf{M}^* = M_0^* + M_1^*\mathbf{i}_1 + M_2^*\mathbf{i}_2 + M_3^*\mathbf{i}_3 = \boldsymbol{\mu}^* + s\boldsymbol{\mu}^{0*}.$$

Здесь Λ — собственный бикватернион винтового конечного перемещения выходного звена манипулятора $x_6y_6z_6$ относительно основания $x_0y_0z_0$, найденный в п. 2; \mathbf{N} — собственный бикватернион винтового конечного перемещения программной системы координат относительно основной системы координат $x_0y_0z_0$; \mathbf{M}^* — собственный бикватернион винтового конечного перемещения выходно-

го звена манипулятора относительно программной системы координат $x_{pr}y_{pr}z_{pr}$. Термин "собственный бикватернион" означает, что каждый из бикватернионов $\Lambda, \mathbf{N}, \mathbf{M}^*$ определен своими компонентами в своей, преобразуемой этим бикватернионом системе координат. Обозначим также \mathbf{M} бикватернион винтового конечного перемещения выходного звена манипулятора относительно программной системы координат $x_{pr}y_{pr}z_{pr}$, определенный своими компонентами в основной системе координат $x_0y_0z_0$. Слово "нормированный" означает, что норма каждого из бикватернионов равна 1, т. е.

$$\|\Lambda\| = \Lambda_0^2 + \Lambda_1^2 + \Lambda_2^2 + \Lambda_3^2 = 1;$$

$$\|\mathbf{N}\| = N_0^2 + N_1^2 + N_2^2 + N_3^2 = 1;$$

$$\|\mathbf{M}\| = M_0^2 + M_1^2 + M_2^2 + M_3^2 = 1;$$

$$\|\mathbf{M}^*\| = M_0^{*2} + M_1^{*2} + M_2^{*2} + M_3^{*2} = 1.$$

Бикватернион Λ положения выходного звена манипулятора в основной системе координат в соответствии со схемой перемещений (15) и бикватернионной формулой сложения конечных перемещений, определенных в одном базисе $x_0y_0z_0$, может быть представлен в виде [5]

$$\Lambda = \mathbf{M} \circ \mathbf{N}, \quad (16)$$

а в соответствии с бикватернионной формулой сложения конечных перемещений, каждый из которых определен в своем преобразуемом базисе, — в виде [5]

$$\Lambda = \mathbf{N} \circ \mathbf{M}^*. \quad (17)$$

Подчеркнем, что в формуле (16) фигурирует бикватернион ошибки местоположения \mathbf{M} , характеризующий отклонение действительного положения выходного звена манипулятора $x_6y_6z_6$ от требуемого программного $x_{pr}y_{pr}z_{pr}$, определенный своими компонентами в основной системе координат $x_0y_0z_0$, а в формуле (17) — бикватернион ошибки местоположения \mathbf{M}^* , определенный своими компонентами в связанном базисе $x_6y_6z_6$.

В соответствии с (16) и (17) бикватернионы \mathbf{M} и \mathbf{M}^* находятся по формулам

$$\mathbf{M} = \Lambda \circ \bar{\mathbf{N}}; \quad \mathbf{M}^* = \bar{\mathbf{N}} \circ \Lambda.$$

Здесь и далее верхняя черта означает символ сопряжения (все бикватернионы нормированные, поэтому обратные бикватернионы равны сопряженным).

Обозначим $\boldsymbol{\omega}$ ($\boldsymbol{\omega}^{pr}$) и $\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$ ($\mathbf{v}^{pr} = \frac{d\mathbf{r}^{pr}}{dt}$) векторы

мгновенной угловой и линейной скоростей движения выходного звена манипулятора (программной системы координат $x_{pr}y_{pr}z_{pr}$) относительно основной системы координат $x_0y_0z_0$. Полагаем, что векторы

$\boldsymbol{\omega}^{pr}$ и \mathbf{v}^{pr} заданы своими проекциями $\omega_i^{pr} = \omega_i^{pr}(t)$ и

$v_i^{pr} = v_i^{pr}(t)$ в программной системе координат $x_{pr}y_{pr}z_{pr}$, а векторы ω и v определены своими проекциями ω_i и v_i в связанной системе координат $x_6y_6z_6$. Мотор (ω , v) мгновенного винта скоростей \mathbf{U} (кинематического винта) выходного звена манипулятора, отнесенный к полюсу O_6 , равен дуальному вектору $\omega + sv$, а мотор (ω^{pr} , v^{pr}) мгновенного винта скоростей \mathbf{U}^{pr} (кинематического винта) программной системы координат, отнесенный к полюсу O_{pr} , равен дуальному вектору $\omega^{pr} + sv^{pr}$ (мотором, или бивектором, называют комплексную композицию двух векторов).

Обозначим $\mathbf{U}_{x_6y_6z_6} = \omega_{x_6y_6z_6} + sv_{x_6y_6z_6}$ — отображение кинематического винта \mathbf{U} выходного звена на связанную с выходным звеном систему координат $x_6y_6z_6$, компоненты $U_i = \omega_i + sv_i$ бикватерниона $\mathbf{U}_{x_6y_6z_6}$ являются комплексными комбинациями проекций ω_i и v_i вектора ω мгновенной угловой скорости выходного звена манипулятора и вектора v мгновенной скорости начала системы координат $x_6y_6z_6$ (точки O_6) на оси системы координат $x_6y_6z_6$.

Аналогично, $\mathbf{U}_{x_{pr}y_{pr}z_{pr}}^{pr} = \omega_{x_{pr}y_{pr}z_{pr}}^{pr} + sv_{x_{pr}y_{pr}z_{pr}}^{pr}$ — отображение кинематического винта \mathbf{U}^{pr} программной системы координат $x_{pr}y_{pr}z_{pr}$ на ее же координатные оси, имеющее компоненты $U_i^{pr} = \omega_i^{pr} + sv_i^{pr}$, определенные в программной системе координат $x_{pr}y_{pr}z_{pr}$.

Под задачей управления движением манипулятора будем понимать задачу приведения связанной с выходным звеном манипулятора системы координат $x_6y_6z_6$ к системе координат $x_{pr}y_{pr}z_{pr}$, движущейся с программным (заданным) мгновенным винтом скоростей $\mathbf{U}^{pr}(t)$ по программной траектории $\mathbf{N} = \mathbf{N}(t)$. Рассматриваем кинематическую постановку задачи управления: полагаем, что управление движением осуществляется за счет сообщения выходному звену мгновенного винта скоростей \mathbf{U} , отображение которого на оси системы координат $x_6y_6z_6$ формируется по одной из следующих формул [3]:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{x_6y_6z_6} &= \mathbf{U}_{x_{pr}y_{pr}z_{pr}}^{pr}(t) + \delta \mathbf{U}_{x_6y_6z_6} = \\ &= (U_1^{pr}(t) + \delta U_1)\mathbf{i}_1 + (U_2^{pr}(t) + \delta U_2)\mathbf{i}_2 + \\ &\quad + (U_3^{pr}(t) + \delta U_3)\mathbf{i}_3; \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{x_6y_6z_6} &= \mathbf{U}_{x_{pr}y_{pr}z_{pr}}^{pr} + \Delta \mathbf{U}_{x_6y_6z_6} = \\ &= \mathbf{M}^{*-1} \circ \mathbf{U}_{x_{pr}y_{pr}z_{pr}}^{pr}(t) \circ \mathbf{M}^* + \Delta \mathbf{U}_{x_{pr}y_{pr}z_{pr}} = \\ &= \mathbf{M}^{*-1} \circ (U_1^{pr}(t)\mathbf{i}_1 + U_2^{pr}(t)\mathbf{i}_2 + U_3^{pr}(t)\mathbf{i}_3) \circ \mathbf{M}^* + \\ &\quad + \Delta U_1\mathbf{i}_1 + \Delta U_2\mathbf{i}_2 + \Delta U_3\mathbf{i}_3. \end{aligned} \quad (19)$$

При такой постановке задачи управления движением манипулятора в качестве математической мо-

дели движения принимаются кинематические уравнения движения стэндфордского манипулятора. Эти уравнения были получены в п. 3 и имеют вид (14):

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

В качестве управлений выступают дуальные ортогональные проекции $U_i = \omega_i + sv_i$ кинематического винта выходного звена на связанные с ним координатные оси. В соответствии с формулами (18), (19) управлении U_i складываются из программных управлений $U_i^{pr}(t)$ и стабилизирующих (корректирующих) управлений δU_i или ΔU_i [3]. При этом управление U_i , определяемые формулой (19), равны дуальным ортогональным проекциям винтовой суммы $\mathbf{U} = \mathbf{U}^{pr} + \Delta \mathbf{U}$ на оси системы координат $x_6y_6z_6$, в то время как управление U_i , определяемые формулой (18), не имеют смысла дуальных ортогональных проекций винтовой суммы $\mathbf{U} = \mathbf{U}^{pr} + \Delta \mathbf{U}$, а выражаются линейным образом через дуальные ортогональные проекции винтов \mathbf{U}^{pr} и $\Delta \mathbf{U}$ на оси разных систем координат ($x_{pr}y_{pr}z_{pr}$ и $x_6y_6z_6$).

Величины $U_i^{pr}(t)$ (программные управление) полагаются заданными дуальными функциями времени. Законы управлений δU_i или ΔU_i строятся с использованием принципа обратной связи, т. е. в виде некоторых функций компонент бикватерниона ошибки местоположения \mathbf{M} или \mathbf{M}^* таким образом, чтобы выходное звено манипулятора переходило из любого выбранного начального положения в любое заданное конечное асимптотически устойчивым образом, т. е. чтобы выполнялось условие $\mathbf{M}(t) \rightarrow \pm 1$ при $t \rightarrow \infty$ или условие $\mathbf{M}^*(t) \rightarrow \pm 1$ при $t \rightarrow \infty$.

В такой постановке обратная задача кинематики формулируется как задача Коши для системы дифференциальных уравнений (14) при условии, что управление ω_i и v_i обеспечивают асимптотическую устойчивость в целом любого заданного положения выходного звена робота-манипулятора. В результате решения задачи Коши для любых заданных начальных значений обобщенных координат манипулятора из их рабочих диапазонов его обобщенные координаты примут в конечный момент времени значения, отвечающие (с заданной степенью точности) требуемому положению схвата робота-манипулятора, и, следовательно, обратная задача кинематики будет решена.

Величины ω_i и v_i являются компонентами отображения кинематического винта \mathbf{U} выходного звена манипулятора на связанные с ним координатные оси. В рассматриваемой обратной задаче кинематики программное управление $\mathbf{U}_{x_{pr}y_{pr}z_{pr}}^{pr}(t) \equiv 0$, поэтому построение управления $\mathbf{U}_{x_6y_6z_6} = \omega_{x_6y_6z_6} + sv_{x_6y_6z_6} = \delta \mathbf{U}_{x_6y_6z_6} = \Delta \mathbf{U}_{x_6y_6z_6}$ может быть выполнено в соответствии с теорией построения стабилизирующего управления, изложенной в работе [3]. В случае использования для описания движения выходного

звена манипулятора нормированных бикватернионов перемещений и трехмерных дуальных управлений (отображений кинематического винта \mathbf{U} выходного звена манипулятора, имеющих нулевые скалярные части) простейший закон управления имеет вид [3]

$$\mathbf{U}_{x_6y_6z_6} = \boldsymbol{\omega}_{x_6y_6z_6} + s\mathbf{v}_{x_6y_6z_6} = -(2K_{oc}^*/M_0^*)\mathbf{M}_{sc}^*, \quad (20)$$

$$\mathbf{M}^* = M_0^* + \mathbf{M}_{sc}^* = \bar{\mathbf{N}} \circ \Lambda(t). \quad (21)$$

Здесь M_0^* и \mathbf{M}_{sc}^* — скалярная и винтовая части собственного бикватерниона ошибки положения выходного звена манипулятора \mathbf{M}^* ; $\mathbf{N} = \text{const}$ — бикватернион, характеризующий программное положение выходного звена; Λ — бикватернион текущего положения схвата манипулятора, который находится через текущие значения обобщенных координат манипулятора; $K_{oc}^* = k + sk_0$ — дуальный коэффициент усиления обратной связи.

Отметим, что законы управления (20), (21) вырождаются при определенном положении выходного звена манипулятора (при $M_0^* = 0$). Этого недостатка можно избежать, если для описания движения выходного звена манипулятора использовать ненормированные бикватернионы перемещений и четырехмерные дуальные управление (бикватернионы угловой и линейной скоростей выходного звена манипулятора с ненулевой скалярной частью). Бикватернион \mathbf{N} , характеризующий программное движение, в этом случае по-прежнему полагаем нормированным, а бикватернионы \mathbf{M} и \mathbf{M}^* — ненормированными бикватернионами, нормы которых равны норме бикватерниона Λ :

$$\|\mathbf{M}\| = \|\mathbf{M}^*\| = \|\Lambda\| = \Lambda \circ \bar{\Lambda} = \Lambda_0^2 + \Lambda_1^2 + \Lambda_2^2 + \Lambda_3^2.$$

В случае использования при построении управлений ненормированных бикватернионов конечных перемещений может быть использован простейший закон управления, имеющий вид [3]

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{x_6y_6z_6} &= \boldsymbol{\omega}_{x_6y_6z_6} + s\mathbf{v}_{x_6y_6z_6} = \\ &= K_{oc}^* T^{-1} \text{screw}(\bar{\Lambda} \circ \mathbf{N}), \end{aligned} \quad (22)$$

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

$$2 \frac{dT}{dt} = K_{oc}^* [\text{scal}(\bar{\Lambda} \circ \mathbf{N}) - T], \quad T(t_0) = 1. \quad (23)$$

Здесь scal — скалярная часть бикватерниона.

Подчеркнем, что в соотношениях (20)–(22) и уравнении (23) фигурирует нормированный бикватернион Λ текущего (углового и линейного) положения выходного звена манипулятора, который находится через обобщенные координаты манипулятора по формулам (3), (5), а постоянный нормированный бикватернион \mathbf{N} программной ориентации выходного звена является заданным. Ненормированные бикватернионы использовались при построении законов управления (22), (23). Отметим, что если закон управления (20) содержит особыю точку в пространстве обобщенных координат, в которой мгновенный эйлеров угол поворота выходного звена относительно его программного положения равен (для текущего момента времени t) π рад, то закон управления (22), (23) является регулярным всюду (не содержащим особых точек).

Список литературы

- Ломовцева Е. И., Челноков Ю. Н. Дуальные матричные и бикватернионные методы решения прямой и обратной задач кинематики роботов-манипуляторов на примере стэнфордского манипулятора. I // Изв. Сарат. ун-та. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2013. Т. 13., вып. 4. С. 82–89.
- Ломовцева Е. И., Челноков Ю. Н. Дуальные матричные и бикватернионные методы решения прямой и обратной задач кинематики роботов-манипуляторов на примере стэнфордского манипулятора. II // Изв. Сарат. ун-та. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2014. Т. 14., вып. 1. С. 88–95.
- 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.
- Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. М.: Мир, 1989. 621 с.
- Челноков Ю. Н. Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения. Геометрия и кинематика движения. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2006. 511 с.

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

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

Received on January 27, 2015

Solution to the problems of direct kinematics with the help of dual cosine matrices and Kliford biquaternions is demonstrated on the example of Stanford robot arm. Derivation of the kinematics equations is performed. The obtained kinematics equations and the solution to the direct kinematics problem are used for solving the inverse kinematics problem. The new method of solving the inverse kinematics problem is based on biquaternion theory of kinematics control of free rigid body motion by using the

feedback principal. Application of the method reduces solving. 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 the generalized coordinates so that every chosen end effector position is asymptotically stable in the whole. In this case any particular solution to the differential kinematics equations will aspire in asymptotically stable way to the desired point in the space of the generalized coordinates corresponding to the target position of the end effector of a manipulator.

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 that the inverse kinematics problem will be solved. The advantages of the new method are the following: the method gives a unique solution (if there is such) for the chosen control law and given initial position; it ensures high accuracy solutions and high performance; but, above all, it is non-iterative. The paper extends and supplements the results presented in [1, 2].

Keywords: robot-manipulator, Stanford robot arm, direct kinematics problem, dual direction cosine matrix, 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:

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 1, *Mekhanika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 6, pp. 373–380.

DOI: 10.17587/mau.16.373-380

References

1. Lomovtseva E. I., Chelnokov Ju. N. *Dual'nye matrichnye i biquaternionnye metody reshenija prjamoj i obratnoj zadach kinematiki robotov-manipulatorov na primere stjensfordskogo manipulatora. I.* (Dual Matrix and Biquaternion Methods of Solving Direct and Inverse Kinematics Problems of Manipulators, for Example Stanford Robot Arm. I), *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Ser. Matematika. Mekhanika. Informatika*, 2013, vol. 13: 4, pp. 82–89 (in Russian).
2. Lomovtseva E. I., Chelnokov Ju. N. *Dual'nye matrichnye i biquaternionnye metody reshenija prjamoj i obratnoj zadach kinematiki robotov-manipulatorov na primere stjensfordskogo manipulatora. II* (Dual Matrix and Biquaternion Methods of Solving Direct and Inverse

Kinematics Problems of Manipulators, for Example Stanford Robot Arm.II), *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Ser. Matematika. Mekhanika. Informatika*, 2014, vol. 14:1, pp. 88–95 (in Russian).

3. Chelnokov Ju. N. *Bikvaternionnoe reshenie kinematičeskoj zadachi upravlenija dvizheniem tverdogo tela i ego prilozhenie k resheniju obratnyh zadach kinematiki robotov-manipulatorov* (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), *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela*, 2013, no. 1, pp. 38–58 (in Russian).

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

5. Chelnokov Ju. N. *Kvaternionnye i bikvaternionnye modeli i metody mehaniki tverdogo tela i ih prilozhenija. Geometrija i kinematika dvizhenija* (Quaternion and Biquaternion Models and Methods of Mechanics of a Rigid Body and their Applications. Geometry and Kinematics.), Moscow, Fizmatlit, 2006, 511 p. (in Russian).

Corresponding author:

Nelaeva Ekaterina I., Postgraduate Student, Chair of Mathematical and Computer Modeling, Saratov State University, Saratov, 410012, Russian Federation, e-mail: LomovtsevaEl@yandex.ru

УДК 621.865.8: 004.946

О. В. Даринцев, д-р техн. наук, зав. лабораторией, ovd@uimech.org,

А. Ю. Алексеев, мл. науч. сотр., aleksandr_na@list.ru,

Б. С. Юдинцев, мл. науч. сотр., bogdan.u86@gmail.com,

Институт механики им. Р. Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН, г. Уфа

Технологии расширенной и виртуальной реальностей как средства компенсации информационной недостаточности микророботов¹

Рассматриваются методики компенсации информационной недостаточности микросистем, основанные на использовании технологий расширенной и виртуальной реальностей. Описаны структура информационной системы, маркера, метод формирования динамического двумерного кода, виртуализация датчиков. Показаны способы использования предлагаемых методик при синтезе нейросетевой системы планирования траекторий коллектива микророботов.

Ключевые слова: расширенная и виртуальная реальности, маркер, двумерный код, коллектив микророботов, нейросетевые системы

Введение

Проблема создания многокомпонентных робототехнических систем или коллективов роботов в настоящее время стала одной из актуальнейших про-

блем робототехники [1]. В основном это связано с заявленной многими министерствами и ведомствами необходимостью проведения работ в экстремальных условиях, характеризующихся высокой опасностью для человека, что исключает проведение этих работ непосредственно человеком и поэтому требует использования роботов. При этом интерес проявляется не только к роботам "стандартных" размеров,

¹ Работа выполняется при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН И.40П "Актуальные проблемы робототехники".

но также намечен целый круг задач для микроботов и микромеханических систем. В отличие от классического использования роботов в промышленности с жестко упорядоченной внешней средой функционирования, при функционировании в экстремальных условиях внешняя среда робота является плохо упорядоченной и недетерминированной, информация об окружающей обстановке является неполной, динамичной и непредсказуемой. Требования высокой мобильности и автономности, предъявляемые к экстремальным роботам, могут быть реализованы лишь при постоянном пополнении и уточнении информации. Для микроботов также характерно то, что выполняемые ими операции обычно являются нетиповыми и достаточно сложно реализуемыми, а их функциональная ограниченность и низкая скорость перемещения приводят к необходимости организации микроботов в коллективы для выполнения функционально сложных или территориально разнесенных действий.

Примеры использования микроботов в настоящее время представлены только лабораторными экспериментами, скромные результаты которых являются следствием ограниченных возможностей бортовых информационных систем. Так, системы ближней локации микроботов могут определить препятствия с точностью не более 50...100 мкм, в то время как точность позиционирования некоторых микроботов составляет 10 нм и выше.

Увеличение же числа и точности датчиков приводит к значительному сокращению времени автономной работы из-за возрастающего энергопотребления.

В связи с вышесказанным актуальной является разработка информационных методик, позволяющих увеличить объем и количество информации, необходимых для качественной работы систем управления и планирования [2].

Постановка задачи

Специфика использования мини- и микроботов состоит в том, что ввиду ограниченности их функциональных возможностей и бортовых источников энергии они способны решать задачи лишь при их массовом применении. Коллективы микроботов, в свою очередь, являются ярким примером проявления эмерджентности, когда у таких сложных систем резко возрастает надежность, гарантируется достижение результата даже при выходе из строя ряда агентов, обеспечивается гибкость алгоритма решения задач за счет временного или территориального распределения операций. Но при всех положительных свойствах использования таких коллективов нерешенными остаются вопросы информационного обмена как между отдельными роботами, так и с верхним уровнем управления или системой контроля. Оперативное получение информации от роботов приобретает особую актуаль-

ность при решении следующих "характерных" задач для многоагентных робототехнических систем:

- мониторинг труднодоступных участков окружающей среды;
- разведка, охранные функции;
- диагностика внутренних полостей сложных объектов;
- выполнение специфичных спасательных работ.

Информационная недостаточность в системах управления коллективом микроботов, кроме объективных аппаратных причин, может быть также и следствием загруженности каналов передачи данных, которой подвержены наиболее популярные в микробототехнике беспроводные технологии передачи данных (*Bluetooth*, *ZigBee*, *WiFi*). Высокая загруженность каналов приводит к запаздываниям в передаче управляющих сигналов, задержкам в получении отклика от агентов, что может привести к ошибкам при отработке операций и даже к потере управляемости всего коллектива.

Поэтому предлагается использовать информационные технологии, основанные на использовании систем виртуальной и расширенной реальностей (*Virtual Reality (VR)* и *Augmented Reality (AR)*), которые в последнее время достаточно часто стали использоваться при решении задач повышения эффективности, надежности систем управления с участием человека.

Использование технологии VR при реализации интерфейса оператора микротехнологического комплекса

Первый опыт использования новых информационных технологий был получен при конструировании микроботов и соответствующей оснастки при создании прототипов микротехнологических комплексов. Кажущаяся простота конструкции микросистем в итоге привела к значительным временными затратам, которые связаны с необходимостью разработки и внедрения в состав проектируемого комплекса новых типов микроботов, а тестирование скоординированной работы с уже существующими устройствами потребовало изготовления натурных образцов и перенастройки систем управления — планирования с учетом новых компонентов [3].

С учетом сложности процессов отладки было предложено разработать систему виртуальной реальности (СВР), которая не только оперирует данными физической среды, но и широко использует модельные и виртуальные данные, конструкции, процессы. Для контроля работы реального оборудования передача в интерфейсную надстройку СВР необработанных телевизионного растра и сенсорной информации с датчиков была заменена на передачу ограниченного числа параметров, образующих вектор состояния всей системы. Тем самым вместо значительного по объему пакета данных в СВР передается минимальный набор параметров, который однозначно определяет состояние техно-

логического оборудования и рабочей среды и, с использованием технологии виртуальной реальности, предоставляет возможность наблюдать рабочую среду из любой точки в пространстве и под любым ракурсом, сделать "разрез" интересующего устройства и т. д. Стереоскопическое визуальное отображение расширило восприятие глубины и ощущение пространства, перевело наблюдаемую область рабочей зоны в "привычный" оператору объемный вид, значительно облегчая задачу восприятия окружающей обстановки и снижая нагрузку. При использовании технологий *VR* появляется возможность осуществлять гиперскопическое визуальное отображение рабочей сцены — одновременное наблюдение с помощью нескольких виртуальных камер под произвольными ракурсами (несколькими наблюдателями, операторами) (рис. 1, см. вторую сторону обложки). При выполнении микроманипуляционных и сборочных операций это может дать качественно новое представление о взаимном расположении объектов и движении рабочих органов относительно целевых точек.

Функционирование СВР базируется на использовании и обработке двух основных видов информации:

- априорные данные, описывающие реальные микротехнологические объекты-прототипы: геометрическая форма и оптические свойства их поверхностей (цвет, отражательные свойства и т. п.);
- апостериорные данные, поступающие в реальном времени из интерфейсного комплекса (копирующий режим работы СВР с привязкой к физической среде) или из моделирующего комплекса (виртуальный режим работы СВР без привязки к физической среде) и описывающие движение и состояния объектов и поведение их подсистем (взаимное движение звеньев, составных движущихся частей и т. п.).

Первый из указанных типов информации используется для синтеза изображений виртуальных объектов, второй — для реконструкции состояния реальной среды (взаимное положение, ориентация) на момент наблюдения.

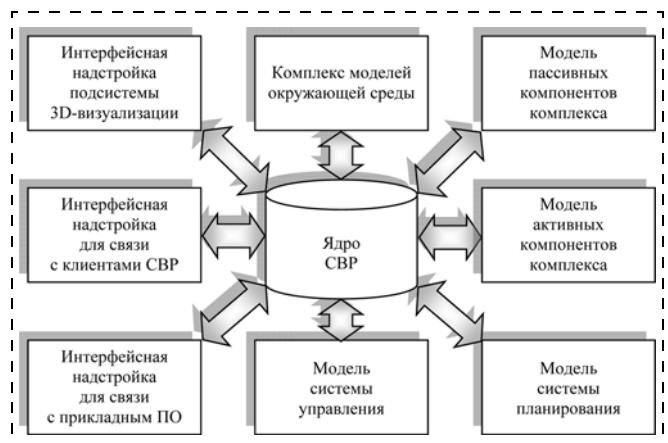


Рис. 2. Иерархическая архитектура СВР

Компьютерная обработка этих видов информации реализуется вычислительным ядром, математическим обеспечением которого являются программные динамически подключаемые алгоритмы систем планирования и управления; вычислительное ядро расположено на вершине многоуровневой иерархической архитектуры СВР (рис. 2). Благодаря выделению в отдельный модуль вычислительного ядра СВР появляется возможность придать системе такие качества, как открытость и модульность (возможность дополнения новых виртуальных моделей активных и пассивных компонентов, моделей окружающей среды и т. д.), возможность унификации библиотек базовых алгоритмов планирования и управления (возможность использования исполнительного кода для управления как физической средой, так и виртуальной), а также относительная универсальность программного комплекса в целом (программно-языковая и аппаратная независимость).

Виртуальное пространство, в котором проводится оценка состояния управляемых объектов системы (микротехнологических роботов, обслуживающих манипуляторов, позиционеров, компонентов сборки и т. д.), можно трактовать как носитель обратной связи, что расширяет традиционное винеровское понятие, и тем самым становится возможной разработка новых подходов к решению задач управления такими сложными техническими объектами, какими являются микротехнологические комплексы.

Предложенная архитектура построения имитационно-технологического комплекса и структура СВР позволяют решить некоторые существенные проблемы управления микросистемами, а разработанные функциональные и информационные схемы взаимодействия уровней комплекса позволяют синтезировать новые методы исследования сложных технических систем и протекающих в них процессов — технологию погружения виртуального объекта в реальный мир с частичным или полным "визуальным" и "тактильно-силовым" ощущением. Побочным эффектом использования *VR* стала разработка комплекса удаленного управления микротехнологическим комплексом [4], который, благодаря значительному сокращению объемов передаваемой информации, позволил реализовать управление микророботами и другими элементами системы с использованием даже смартфонов при сохранении визуального контроля.

Использование технологий *AR* при синтезе систем управления — планирования коллективов микророботов

Если в прототипе микротехнологического комплекса, описанного выше, предполагалось использование не более трех микророботов, то в случае с коллективом микророботов планируется не менее десятка (десятков) активных агентов. Недостатки информационного обеспечения систем управления —

планирования коллектива роботов часто приводят к синтезу жесткого набора базовых алгоритмов или сценариев для роботов заданных уровней иерархии, что делает невозможным реализацию различных методов адаптации и самообучения, динамики изменения целей, коррекции приоритетов задач и т. д. Достаточно часто для контроля коллектива микророботов используют системы технического зрения (СТЗ), что позволяет, используя технологии расширенной реальности, без значительных затрат решить вышеупомянутую проблему, повысить надежность каналов обратной связи и увеличить объемы информации об окружающей среде, а также обеспечить функционирование в едином информационном и оперативном пространстве. Последний из приведенных эффектов в конечном итоге должен обеспечить создание именно коллектива роботов и реализацию коллективного поведения, а не построение классической распределенной робототехнической системы. Поэтому вопросы информационной достаточности имеют большую значимость, и особые требования к объему данных предъявляются со стороны системы планирования траекторий.

В работе [5] описывается метод планирования траекторий мобильных роботов на основе "нейронных карт", базирующийся на использовании рекуррентной самоорганизующейся нейронной сети с заданной топологией, которая отображает дискретное рабочее пространство мобильных роботов в формате, удобном для работы алгоритма. Траектории рассчитываются по информации о состоянии рабочего пространства, поступающей от СТЗ или от датчиков препятствий отдельных роботов. Если рабочее пространство изменилось или робот обнаружил на своем пути неизвестное препятствие, возникает необходимость оповещения системы об обнаружении нового препятствия и внесения его координат на общедоступную карту рабочей зоны, после чего необходимо выполнить пересчет конфликтных траекторий. Задачу оперативной передачи информации о таких изменениях можно решить не только увеличением скорости опроса коллектива роботов, но и с помощью имеющейся СТЗ и динамических маркеров — основных элементов технологии расширенной реальности. В таблице представлены перспективы использования AR при решении различных задач при управлении коллективом роботов.

Маркеры расширенной реальности. Для проведения экспериментов в качестве одного из первых вариантов маркера был выбран двумерный код (рис. 3), который отображается на дисплее мобильного робота (передатчик) и распознается СТЗ (приемник); шаблон поиска двумерного кода выбран из расчета плотности упаковки информационного сообщения [6]. При этом в процессе работы информационная плотность маркера может меняться, например, в случае работы в штатном режиме, когда объем передаваемой информации минимален,

Возможности технологии расширенной реальности

Задачи	Применение
Задачи равномерного распределения (поддержание "строя", соблюдение дистанций, обход "запрещенных" зон, следование за "ведущим")	Одномоментное получение обобщенной информации о действиях всего коллектива (локализация роботов, дистанция, состояние)
Инспекционные задачи (обнаружение препятствий, следование к заданным координатам, поиск маяков)	Обнаруженное мобильным роботом скрытое препятствие, нераспознанное СТЗ, достраивается на карте, что в дальнейшем позволяет их учитывать при построении маршрутов движения других роботов
Манипуляция оптически неразличимыми небольшими объектами (захват, поворот, перенос объекта)	Система может достроить виртуальный объект и визуализировать процесс его обработки роботом

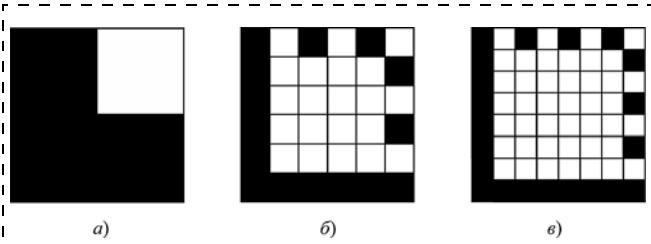


Рис. 3. Маркер расширенной реальности, объем данных:
а — минимальный; б — штатный режим; в — максимальный

маркер робота укрупняется. Увеличение геометрических размеров отдельного элемента маркера упрощает процесс распознавания кода и служит в качестве признака отсутствия непредвиденных ситуаций. В то время как "рядовые" агенты коллектива, работая в штатном режиме, передают минимально необходимое сообщение, выделяемый координатор группы отправляет более подробный детальный код.

Для корректной работы оптического канала передачи информации был разработан базовый алфавит языка, учитывающий особенности работы в штатных и нештатных ситуациях [7]. Минимальный объем информации, который в штатном режиме требуется передать агенту коллектива, — это статус "нет проблем", означающий, что робот выполняет поставленную задачу, все действия проводятся без задержки и посторонних помех. Для передачи такого статуса требуется один бит информации — достаточно отобразить на дисплее один белый квадрат в черной рамке (рис. 3, а).

При передаче более подробной информации о текущей активности мобильный робот генерирует информационный маркер с менее крупными ячейками, который, например, может содержать информацию о текущем состоянии агента, его идентификационный номер и линейную скорость (рис. 3, б). Для предотвращения возможных потерь сообще-

Результаты экспериментов

Для проверки предлагаемых методик использования технологий *AR* и *VR* были сконструированы и изготовлены мобильные роботы (рис. 6), в которых для индикации маркеров кодов используются полноцветные *OLED*-дисплеи [3].

Апробировались предлагаемые методики использования технологий *AR* и *VR* в ходе экспериментов с нейросетевой системой планирования траекторий, которая построена на базе сети Хопфилда и выполняет следующие операции.

1. Ввод начальных значений нейросети: координаты цели, расположение известных препятствий, генерация нормированного вектора приоритетов $P = [P_1, P_2, \dots, P_n]$ со значениями приоритета для 1-го, 2-го и n -го мобильного робота соответственно.

2. Формирование нейронных карт в виде матрицы энергии сети для каждого из агентов.

3. Работа конструктора пути.

4. Пошаговый расчет и коррекция траектории для каждого мобильного робота с учетом возникших конфликтных ситуаций и приоритетов.

Когда в траекторийный конфликт вовлечено более двух агентов, итерационный процесс затягивается, и для некоторых вариантов окружающей обстановки может быть построена энергетически невыгодная траектория агента с многочисленными остановками, резкими изменениями курса и т. д. Достаточно часто такая ситуация встречается при перемещениях в ближайшей окрестности агента других роботов с более высоким приоритетом, так называемых динамических препятствий. В ходе экспериментов отрабатывалась технология использования в процессе синтеза новых траекторий виртуальных препятствий и искусственных "шлейфов". Если виртуальные препятствия по координатам совпадают с текущим положением в пространстве роботов, обладающих более высоким приоритетом, то направление шлейфа (виртуальное препятствие с потенци-

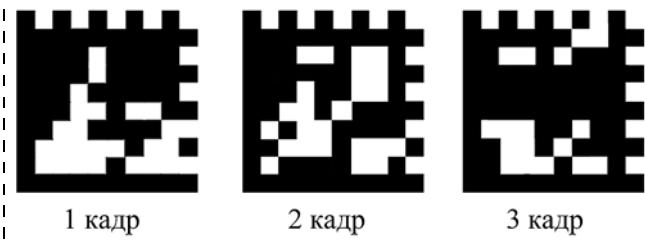


Рис. 4. Пример раскадровки динамического двумерного кода

ние кодируется методом Рида—Соломона, что дает возможность восстановить при распознавании кода до 30 % ошибочно принятых данных.

При отработке алгоритмов достижения цели, предусматривающих такие маневры, как объезд препятствий, следование за ведущим, поиск маяков, мониторинг окружающего пространства, могут иметь место различные нештатные ситуации:

- появление нового препятствия или другого мобильного робота;
- разряд аккумулятора;
- отказ датчика, двигателя, узла и т. д.

В этом случае предусматривается генерация наиболее насыщенного пакета данных в виде информационного сообщения с мелкими ячейками кода, емкость которого (размер ячейки) зависит от разрешающей способности СТЗ (рис. 3, в). Для передачи данных большего объема генерируется так называемый динамический код, представляющий последовательную передачу отдельных кадров пакета, формируемым таким образом, чтобы обеспечить целостность информации при передаче (рис. 4).

Другой апробированный вариант маркера расширенной реальности был реализован в виде квадрантного кода, который получил такое название, потому что его центральная часть представляет собой круг, разделенный на квадранты, соответствующие направлениям робота "вперед", "назад", "влево", "вправо". Направление "вперед" выделено слева полноразмерным черным шевроном, а справа расположен шеврон половинного размера; в центре возможно присутствие черного "опорного" квадрата (рис. 5, см. вторую сторону обложки). Квадранты кода заливаются контрастными цветами в зависимости от данных, получаемых с датчиков расстояния, размер заливки соответствует дистанции до соседнего робота или препятствия в данном направлении, при этом без использования опорного квадрата применяются только три варианта заливки: "далеко", "норма", "близко".

Предлагаемый квадрантный код используется при работе системы планирования траекторий, так как он позволяет оперативно получать и одновременно обрабатывать информацию о ближайшей окрестности большого числа роботов, входящих в состав коллектива: в одном кадре может находиться значительная часть коллектива или даже он весь.

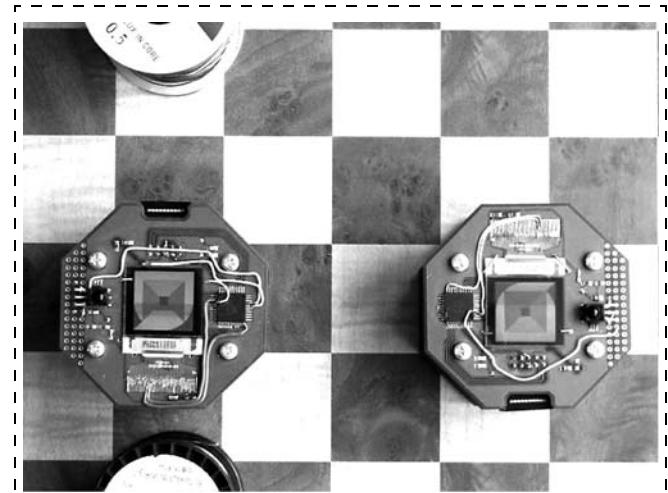


Рис. 6. Эксперименты с маркерами на реальных роботах: слева — двумерный код, справа — квадрантный

альной энергией выше статичного препятствия, но ниже энергии свободных ячеек) совпадает с направлением перемещения этих роботов, а длина шлейфа пропорциональна их скорости.

Примененная в ходе экспериментов виртуализация препятствий, изменение весовых характеристик соответствующих узлов нейросети в зависимости от параметров шлейфа позволили избавиться от многошаговых итерационных процессов коррекции траекторий и тем самым поднять производительность системы планирования на 10...15 %, получить в итоге более гладкие, энергетически эффективные решения.

Один из полученных при моделировании результатов представлен на рис. 7. Так как нейросетевая система планирования в основном предназначена для синтеза траекторий в ближайшей окрестности робота, то для экспериментов использовали рабочее пространство небольших размеров: в данном случае 10×10 . Поэтому для оценки эффективности работы исследуемых алгоритмов синтеза траекторий, приведенных на рис. 7, б и 7, в, использовали такие параметры, как длина траекторий, время перемещения, рысканье по курсу, число и время остановок.

Заключение

Приведенные в статье методики использования технологий виртуальной и расширенной реальностей позволяют повысить качество работы систем управления микророботами за счет создания нового канала связи, предоставляющего возможность увеличить не только скорость передачи информации за счет одновременного получения в одном кадре данных от многих роботов, но и скорость генерации сигналов управления, новых траекторий благодаря технологиям параллельной и мультипоточной обработки. Хорошие перспективы при синтезе систем управления коллективом мобильных роботов показало использование маркеров и других элементов технологий расширенной и виртуальной реальностей [8].

Список литературы

- Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустин С. Г. Модели и алгоритмы коллективного поведения в группах роботов. М.: Физматлит, 2009.

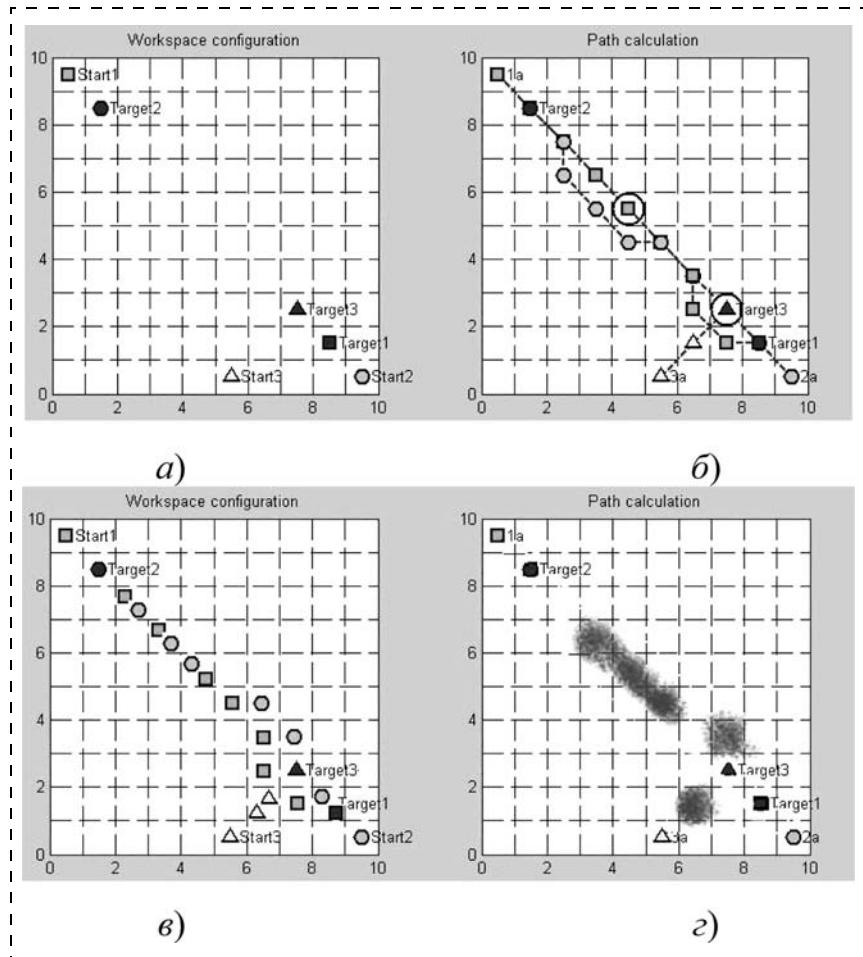


Рис. 7. Результаты работы нейросетевой системы планирования:
а — исходное состояние; б — классический алгоритм работы; в — алгоритм с использованием виртуальных препятствий и шлейфов; г — конфликтные участки траекторий, где использовалась виртуализация

2. Кулаков Ф. М. Технология погружения виртуального объекта в реальный мир // Информационные технологии. Приложение. 2004. № 10.

3. Даринцев О. В., Мигранов А. Б. Манипуляционные микроробототехнические системы и проблемы производства гибридных МЭМС // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 2. С. 38—44.

4. Даринцев О. В., Мигранов А. Б. Виртуальный комплекс управления микророботами через сеть Интернет // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 3. С. 37—39.

5. Юдинцев Б. С., Даринцев О. В. Экспериментальные исследования эффективности нейросетевой системы планирования траекторий для коллектива мини (микро) роботов // Proc. of the 2nd Internat. Conf. "Information Technologies for Intelligent Decision Making Support" and the Intended International Workshop "Robots and Robotic Systems", May 18—21. Ufa, Russia. 2014. Vol. 3. Р. 274—278.

6. Алексеев А. Ю. Оптический код как информационный базис интеллектуальной системы принятия решений группы мобильных роботов // Proc. of the 2nd Internat. Conf. "Information Technologies for Intelligent Decision Making Support" and the Intended International Workshop "Robots and Robotic Systems", May 18—21, Ufa, Russia. 2014. Vol. 3. Р. 279—283.

7. Алексеев А. Ю. Оптический канал беспроводной передачи данных коллектива мобильных роботов // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 1. URL: <http://www.science-edu.ru/115-11922> (дата обращения: 30.01.2014).

8. Даринцев О. В. Использование технологий расширенной и виртуальной реальностей при реализации алгоритмов управления коллективом роботов // Искусственный интеллект. 2013. № 3. С. 479—487.

Technologies of Augmented and Virtual Realities as Means for Compensation for the Information Insufficiency of Microrobots

O. V. Darintsev, ovd@uimech.org, **A. Ju. Alekseyev**, aleksandr_na@list.ru,
B. S. Yudincev, bogdan.u86@gmail.com, Institute of Mechanics named after R. R. Mavlyutov,
Ufa Research Center, RAS, Ufa, 450054, Russian Federation

Received on February 25, 2015

The article presents techniques for compensation for microsystems' information insufficiency, based on the use of augmented and virtual realities. The constructed system of virtual reality makes it possible to reduce considerably the volumes of information of the robotic system transferred between its components. The article also contains description of the information system's structure, of a marker, of a method for synthesis of a dynamic two-dimensional code, and virtualization of the sensors. Collisions are avoided by keeping strictly the buffer distances and consistent communication between the robots with the use of 2D marker and quadrant codes, which are shown in the mobile robots. Obstacle identification is implemented due to the perceiving ability of the robotic agents in a collective and the ability of a global vision system. Often obstacles cannot be identified through vision mechanisms. In this case, virtual objects in global maps may be used instead of small real obstacles, which are located by the robot local sensors only. Sharing the obstacle information within the group can be achieved by broadcasting signals to the control or trajectory planning system with the help of markers of augmented reality. During experiments the technology of the virtual obstacles and artificial "loops (comet tail)" for synthesis of new trajectories was realized. The authors demonstrate the ways of using the offered techniques for a synthesis of the neural network system planning of the trajectories for a microrobot collective.

Keywords: augmented and virtual realities, marker, two-dimensional code, collective of microrobots, neural network systems

Acknowledgements: This work is performed with financial support of the Program of basic researches of Presidium of the RAS of I.40P "Actual problems of a robotics".

For citation:

Darintsev O. V., Alekseyev A. Yu., Yudincev B. S. Technologies of Augmented and Virtual Realities as Means for Compensation for the Information Insufficiency of Microrobots, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 6, pp. 380–386.

DOI: 10.17587/mau.16.380-386

References

1. **Kaljaev I. A., Gajduk A. R., Kapustjan S. G.** *Modeli i algoritmy kollektivnogo povedenija v gruppah robotov* (Models and algorithms of collective behavior in groups of robots), Moscow, Fizmatlit, 2009 (in Russia).
2. **Kulakov F. M.** *Tehnologija pogruzhenija virtual'nogo ob'ekta v real'nyj mir* (Technology of encapsulation of virtual object to the real world), *Informacionnye Tehnologii, Prilozhenie*, 2004, no. 10 (in Russia).
3. **Darintsev O. V., Migranov A. B.** *Manipulacionnye mikrorobototehnickie sistemy i problemy proizvodstva gibriddenyj MEMS* (Handling microrobotic systems and problems of production of hybrid MEMS), *Nano- i Mikrosistemnaja Tehnika*, 2005, no. 2, pp. 38–44 (in Russia).
4. **Darintsev O. V., Migranov A. B.** *Virtual'nyj kompleks upravlenija mikrorobotami cherez set' Internet* (Virtual complex of micro-robots control through the Internet), *Mekhatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2007, no. 3, pp. 37–39 (in Russia).
5. **Judincev B. S., Darintsev O. V.** *Jeksperimental'nye issledovanija jeffektivnosti nejrosetevoj sistemy planirovanija traektorij dlja kollektiva mini (mikro) robotov* (Experimental research of efficiency of neural network system of planning trajectories for mini (micro) robots collective), *Proc. of the 2nd International Conference "Information Technologies for Intelligent Decision Making Support" and the Intended International Workshop "Robots and Robotic Systems"*, May 18–21, Ufa, Russia, 2014, vol. 3, pp. 274–278 (in Russia).
6. **Alekseev A. Ju.** *Opticheskij kod kak informacionnyj bazis intellektual'noj sistemy prinyatija reshenij gruppy mobil'nyh robotov* (Optical code as information basis for intellectual decision-making system of mobile robots group), *Proc. of the 2nd International Conference "Information Technologies for Intelligent Decision Making Support" and the Intended International Workshop "Robots and Robotic Systems"*, May 18–21, Ufa, Russia, 2014, vol. 3, pp. 279–283 (in Russia).
7. **Alekseev A. Ju.** *Opticheskij kanal besprovodnoj peredachi dannyh kollektiva mobil'nyh robotov* (Optical channel wireless data transmission collective of mobile robots), *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovanija*, 2014, no. 1 (in Russia); available at: <http://www.science-education.ru/l15-11922>.
8. **Darintsev O. V.** *Ispol'zovanie tehnologij rasshirennoj i virtual'noj real'nostej pri realizacii algoritmov upravlenija kollektivom robotov* (Use of technologies of augmented and virtual realities at realization of control algorithms of robots collective), *Iskusstvennyj Intellekt*, 2013, no. 3, pp. 479–487 (in Russia).

Corresponding author:

Darintsev O. V., D. Sc., Head of Department, Institute of Mechanics of Ufa Branch, RAS, Ufa, 450054, Russian Federation, e-mail: ovd@uimech.org

ИНФОРМАЦИЯ

7—9 сентября 2015 г.
в районе Волгограда (база отдыха в "Волго-Ахтубинской пойме") состоится

XII Всероссийская школа-конференция молодых ученых "УПРАВЛЕНИЕ БОЛЬШИМИ СИСТЕМАМИ"

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

- Фундаментальные математические основы теории управления
- Информационные технологии в управлении
- Управление организационными, социально-экономическими системами
- Управление эколого-экономическими и медико-биологическими системами
- Управление техническими системами, технологическими процессами и промышленными установками

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Волгоградский государственный университет, каф. ФИОУ
Телефоны: +7 927 067 0231. E-mail: voronin.prof@gmail.com

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ В БОЛЬШИХ СИСТЕМАХ

УДК 378.147

А. Н. Данилов, канд. техн. наук, доц., dan@pstu.ru,

В. Ю. Столбов, д-р техн. наук, декан факультета прикладной математики и механики, ck@pstu.ru,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Об одном алгоритме управления синергетической открытостью организационно-технических систем

Рассматривается задача управления синергетической открытостью организационно-технических систем в условиях рыночной экономики. В качестве параметров управления выступают периоды перепланирования на каждом иерархическом уровне принятия решений. Показано, что повышение открытости системы требует согласованности структурных параметров на различных уровнях планирования. Приводится пример применения алгоритма при управлении открытостью системы планирования крупного промышленного предприятия.

Ключевые слова: синергетическая открытость, параметры порядка, степень открытости, управление

Введение

В критические моменты развития общества, как отмечено в работе [1], чрезвычайно важно иметь возможность прогнозирования развития ситуации. Такую возможность предоставляет синергетика, разработавшая методы нелинейного моделирования и прогноза развития сложных систем различной природы. Отличительным свойством синергетического моделирования является то, что в отличие от кибернетических и математических моделей [1], предполагающих учет, возможно, большего числа параметров и воздействий, синергетические модели оперируют одним или несколькими так называемыми параметрами порядка системы, определяющими ее поведение и развитие. При этом идея целостности модели преобладает над идеей ее полноты.

Синергетический подход применим к моделированию нелинейных процессов (планирования, организации, производства, контроля и т. д.), протекающих в организационно-технических (производственных, информационных, образовательных и т. д.) системах в переходные периоды времени. Вопросами самоорганизации сложных систем на основе синергетического подхода занимались многие зарубежные и отечественные ученые, такие как И. Пригожин [2], Г. Хакен [3], И. Стенгерс [2], Д. И. Трубецков [4], Ю. М. Горский [5], В. И. Шаповалов [6] и другие. Однако исследования этих авторов в основном посвящались физическим, социальным или информационным системам. Работ, посвященных решению важной научно-технической проблемы — развитию синергетического подхода к управлению системами масштаба крупного промышленного предприятия, практически нет, что обуславливает актуальность данных исследований.

Считается, что в условиях рыночных отношений основным критерием эффективности функционирования системы является ее конкурентоспособность на рынке товаров и услуг, определяемая соотношением между качеством и ценой продукции. Поэтому необходимо учитывать взаимосвязь между качеством и затратами на его достижение. Другими словами, лучшим является то качество, которое, с одной стороны, является приемлемым для потребителя, а с другой стороны, достигается при минимальных затратах. Это связано с тем, что рынок товаров и услуг постепенно достигает своего насыщения, и конкурентная борьба за потребителя будет продолжаться не только за счет повышения качества продукции или услуг, но и за счет одновременного уменьшения затрат на его достижение. При этом следует отметить, что под качеством здесь понимается системное свойство, включающее как качество процессов, протекающих в системе, так и качество результата функционирования системы.

Будем считать, что конкурентоспособность системы является некоторым функционалом, зависящим от ее параметров порядка. Следует отметить, что каждая система характеризуется своим набором параметров порядка на определенном промежутке времени. При этом каждый параметр порядка является некоторой агрегирующей величиной, определяющей желательное состояние системы или новое ее системное свойство.

Остановимся на тех параметрах порядка, которые, на наш взгляд, являются характерными для любой организационно-технической системы. Одним из них является гарантированное качество, понимаемое в широком смысле в рамках концепции TQM [7], направленной на удовлетворение требований потребителей товаров и услуг. Другим параметром

порядка является синергетическая открытость системы, под которой понимается способность системы быстро реагировать на внешние воздействия (запросы общества, государства и рынка) путем инновационных механизмов организации и самоорганизации. При этом надо понимать, что оба этих параметра нелинейным образом влияют на конкурентоспособность системы, причем в условиях перехода на новую парадигму развития общества эта нелинейность может быть очень существенной. Кажется, что чем выше гарантированное качество и синергетическая открытость системы, тем выше ее конкурентоспособность. Однако это далеко не всегда так. Например, известно [6], что при переходе от закрытой системы к открытой одновременно происходят процессы организаций, самоорганизации и дезорганизации. Поэтому при резком повышении открытости системы процесс дезорганизации может стать доминирующим, что приведет к потере устойчивости и разрушению системы (поз. 1 на рис. 1). Наоборот, при медленном росте синергетической открытости конкурентоспособность системы можно значительно повысить за счет успешной структурной модернизации и адаптации к внешним воздействиям (поз. 2 на рис. 1). Однако оптимальная скорость повышения открытости в значительной мере зависит от особенностей системы и выделяемых ресурсов на ее модернизацию.

Поэтому возникает необходимость постановки и решения задачи управления синергетической открытостью системы на определенном периоде ее развития.

Постановка задачи управления синергетической открытостью системы

Конкурентоспособность системы обозначим K . Тогда в момент времени $\tau = t$ значение вектора конкурентоспособности системы $K(t)$ в рамках основного вида деятельности можно определить как некоторый функционал F вектора процессов $\Pi(\tau)$ в виде:

$$K(t) = F[t; \Pi(\tau), t_0 \leq \tau \leq t], \quad (1)$$

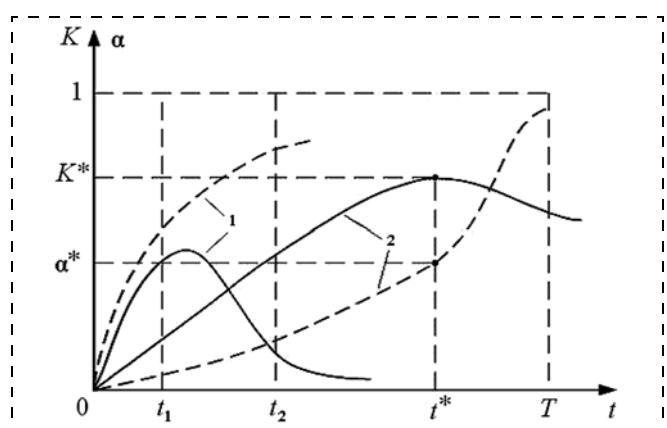


Рис. 1. Зависимости конкурентоспособности (K) и синергетической открытости системы (α) от времени (— — K ; - - - α)

где $\Pi(\tau)$ — бизнес-процесс, определяющий вид деятельности и включающий набор основных процессов (планирования, организации, производства, сбыта и т. д.), протекающих в системе в рассматриваемый период времени.

Построение конкретных видов функционала F для различных видов систем представляет собой сложную проблему теории управления организационно-техническими системами. Поэтому на практике пытаются упростить эту задачу различными способами. Например, вместо функционала (1) устанавливаются функциональные отношения между комплексными показателями конкурентоспособности и параметрами основных процессов.

Следует отметить, что в простейшем случае значение вектора показателей $K(t)$ в момент времени t является просто аналитической вектор-функцией параметров процесса $\Pi(t)$ в этот же момент времени. Тогда можно записать:

$$K(t) = f(\Pi(t)). \quad (2)$$

Введем вектор параметров порядка $x = (x_1(t), \dots, x_n(t))$, который в общем случае является n -мерным и описывает все протекающие процессы с системной точки зрения в некоторый период времени $[0, T]$. Будем считать, что на заданном отрезке времени конкурентоспособность рассматриваемой системы $K(t)$ есть некоторая скалярная функция вида

$$K(t) = f(x(t), \dot{x}(t)), \quad (3)$$

где $\dot{x}(t) = \frac{dx}{dt}$.

Очевидно, что каждая система стремится повысить свою конкурентоспособность, т. е. устремить введенный функционал к максимуму.

Однако для повышения конкурентоспособности системы необходимы ресурсы R (материальные, финансовые и т. п.), которые являются ограниченными. Поэтому каждая система на определенный период времени $[0, T]$ должна решать соответствующую оптимизационную задачу, которую в общем виде можно сформулировать следующим образом:

найти такие кусочно-непрерывные функции $x^*(\cdot) \in KC([0, T]; R^n)$, доставляющие максимум функционалу конкурентоспособности

$$K = K(x(\cdot)) \rightarrow \max \quad (4)$$

при следующих ограничениях на ресурсы:

$$R_j(x(\cdot)) \leq R_j^*, j = 1, \dots, m, \quad (5)$$

и ограничениях на параметры управления:

$$x(t) \in X, t \in [0, T], \quad (6)$$

где R_j^* — заданные ограничения на ресурсы, X — множество допустимых значений параметров управления.

Следует отметить, что задача управления производственным процессом организационно-технической системой (4)–(6) в общем случае в настоящее

время решена быть не может. Это связано с тем, что, во-первых, общий аналитический вид функционала K неизвестен, во-вторых, искомые функции могут терпеть разрывы на отрезке $[0, T]$ (особенно в период смены парадигмы развития и перехода на инновационные технологии) и, в-третьих, размерность данной задачи в общем случае может быть очень большой, что затрудняет ее численное решение.

Поэтому предлагается провести декомпозицию данной задачи, т. е. разбить ее на частные задачи оптимизации. При этом следует отметить, что для части параметров порядка рассматриваемых систем существуют единые методики их определения, и связь этих параметров с конкурентоспособностью достаточно очевидна (считается, чем выше эти показатели, тем выше эффективность производственной деятельности системы). Примеры таких параметров порядка приведены, например, в работе [1].

В то же время два из оставшихся параметров — степень открытости системы и уровень гарантированного качества, которые являются достаточно новыми, появившимися в связи с новой парадигмой развития общества, — требуют дополнительных исследований. Это связано с тем, что эти параметры не только не умеют вычислять, но и часто не знают, как качество и открытость влияют на конкурентоспособность системы. Однако в связи с переходом на новую парадигму они являются не менее значимыми для эффективного развития системы.

Следует отметить, что все частные задачи, получаемые при декомпозиции общей задачи управления, являются связанными между собой. Другими словами, решение одной из частных задач не должно ухудшать параметры состояния всей организационно-технической системы в рассматриваемые моменты времени. Например, рассмотрим задачу повышения открытости системы на некоторый период времени. Очевидно, что повышение степени открытости системы в начальный момент времени приведет к повышению конкурентоспособности. Однако если скорость повышения степени открытости будет достаточно большой и в системе не успеют пройти необходимые процессы организации и самоорганизации, то качество всех процессов жизненного цикла продукции будет снижаться, что приведет и к снижению конкурентоспособности системы (рис. 2). Поэтому важно при повышении степени открытости системы уметь оценивать не только показатели ее эффективности, но и качество системы через уровень организации протекающих в ней основных процессов. В связи с тем что зависимость конкурентоспособности системы от степени ее открытости неизвестна, предлагается использовать пошаговый алгоритм управления. На каждом шаге устанавливается некоторый заданный уровень открытости систем и определяется оптимальное время его достижения с учетом имеющихся ресурсов и рисков разрушения системы.

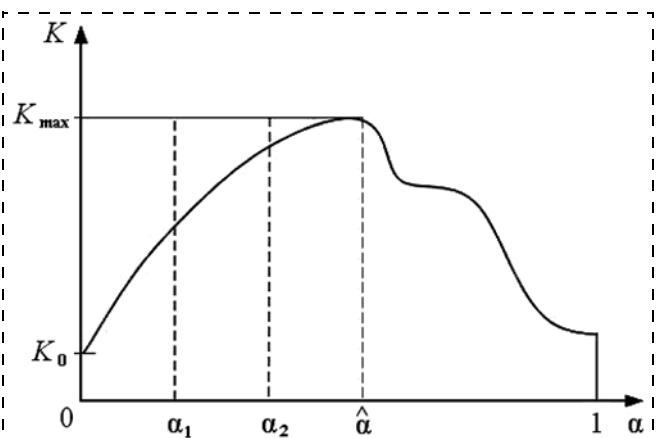


Рис. 2. Зависимость конкурентоспособности системы от ее синергетической открытости

Теперь общую задачу управления производственным процессом можно свести к последовательности следующих частных задач оптимизации:

найти такое оптимальное время t^* , $t^* \in [0, T]$, при котором

$$t^* \rightarrow \min \quad (7)$$

и выполняются ограничения

$$\dot{\alpha}(t) \leq \dot{\alpha}_{\text{крит}}, \quad t \in [0, T], \quad (8)$$

$$R_j(\alpha(\cdot)) \leq R_j^*, \quad j = 1, \dots, m, \quad (9)$$

$$\alpha(0) = \alpha_0, \quad \alpha(t^*) = \alpha_1. \quad (10)$$

Здесь $\dot{\alpha}_{\text{крит}}$ — заданная максимальная скорость повышения открытости системы; R_j^* — заданные ресурсы; α_1 — заданный уровень открытости системы.

Проведенная декомпозиция общей задачи управления (4)–(6) позволяет свести ее решение к последовательности частных задач (7)–(10) по следующему алгоритму:

- выбираются параметры порядка $x(t)$ исследуемой системы и проводится их оценка в некоторый момент времени, который считается начальным;
- строится функция, описывающая зависимость степени синергетической открытости системы α от параметров процессов;
- определяются необходимые ресурсы R_j^* и ограничение на скорость повышения степени синергетической открытости $\dot{\alpha}_{\text{крит}}$, при котором в системе успеют произойти изменения за счет организации и самоорганизации без ее разрушения;
- решается задача (7)–(10) и определяется время t^* , при котором система повысила свою синергетическую открытость до заданного уровня;
- оцениваются параметры порядка системы в момент времени t^* .

Если остальные параметры порядка не ухудшились при новом состоянии системы, соответствующем заданной степени ее синергетической открытости, то возможно последующее повышение открытости системы путем решения задачи (7)–(10) при более высоком заданном значении α .

Если хотя бы один параметр порядка ухудшился при новом состоянии системы, соответствующем заданной степени ее синергетической открытости, то необходимо заново решить задачу (7)–(10) при более низком заданном значении α или повышенных значениях выделяемых ресурсов на обновление системы.

Рассмотрим применение предложенного алгоритма на примере управления синергетической открытостью производственной системы.

Пример управления синергетической открытостью производственной системы

Современное промышленное предприятие может быть рассмотрено как большая и сложная производственная система, представляющая собой совокупность иерархии целей (номенклатура и объем выпускаемой продукции), иерархии принятия решений (производственное планирование и управление) и иерархии бизнес-процессов (совокупность технологических процессов, связанных в технологические маршруты производства каждого вида продукции).

Производственная система функционирует в окружении рынков продукции, сырья, труда и инноваций, взаимодействуя с этими рынками, обмениваясь информацией, материальными и трудовыми ресурсами.

Внешней средой для производственной системы также является общество, находящееся на определенном уровне развития, преследующее некоторые цели и взаимодействующее с производственной системой через политические, экономические и социальные институты.

Производственная система вынуждена постоянно адаптироваться к тем изменениям, которые происходят в окружающей ее среде, путем модификации и развития своих внутренних иерархий, которые работают в тесном взаимодействии, имеют различные интересы (часто конфликтные) и должны находиться в некотором равновесном состоянии, обеспечивающем ее функционирование и развитие.

Отметим, что производственная система является частным случаем социально-технической системы [8], в которой в качестве объекта управления выступает техническая система, непосредственно реализующая технологические операции, а в качестве субъекта управления наряду с менеджментом предприятия рассматриваются потребители продукции и все заинтересованные в успешном функционировании и развитии производственной системы социальные группы: собственники, инвесторы, персонал, поставщики, общество в целом.

Следует отметить, что система обладает определенной самостоятельностью по отношению к элементам, ее образующим. Как отмечено в работах [3, 6], наблюдая за поведением каждого элемента и зная все свойства этих элементов, невозможно предвидеть их коллективное поведение, зависящее как

от влияния внешней среды, так и от взаимодействия между элементами. Например, изучая поведение каждого рабочего, нельзя предсказать изменение организации производственной деятельности предприятия. Поэтому управление организацией сложной системы, какой, несомненно, является производственная система, более эффективно проводить на "макроуровне", а в качестве меры организованности системы выбрать энтропию [3, 6].

Энтропия является количественной мерой беспорядка в системе. Чем больше энтропия состояния системы, тем большим числом способов взаимодействия элементов системы оно может быть реализовано и тем менее оно упорядочено. Известно [6], что в абсолютно замкнутой системе все необратимые процессы сопровождаются увеличением энтропии, по окончании которых энтропия принимает максимальное значение.

В работе [6] показано, что существует такая степень незамкнутости (открытости) системы, при которой закон возрастания энтропии действует. При этом внешнее воздействие на систему ограничивает число возможных микросостояний, уменьшая ее энтропию. Однако эти утверждения выполняются при условии, что изменение энтропии системы намного больше изменения энтропии внешней среды, вызванного их взаимодействием. Такая внешняя среда называется энтростатом, т. е. изменением энтропии энтростата можно пренебречь по сравнению с изменением энтропии исследуемой системы.

Например, рассмотрим две производственные системы, выпускающие однотипную продукцию на разных предприятиях в рамках промышленной кооперации, т. е. комплектующие для продукции одного предприятия могут выпускаться на другом, и наоборот. Тогда имеем дело с двумя открытыми системами, которые друг для друга не являются энтростатами. Если же предприятие выпускает на рынок продукцию, которую производят без внешних поставщиков комплектующих, то другие предприятия, производящие эту же продукцию, могут считаться энтростатом для этого предприятия, влияющим на рассматриваемую производственную систему только как внешняя среда через формирование "спроса — предложения" на рынке сбыта данной продукции.

Все изменения, которые происходят при взаимодействии системы и энтростата, относятся к ней самой, что позволяет сравнивать энтропию открытых систем. Для этого, следуя работе [6], введем некоторый феноменологический параметр α , который назовем *степенью синергетической открытости системы* и который может изменяться от 0 до 1. Данный параметр характеризует значение всех изменений, которые произошли с системой в результате ее взаимодействия с энтростатом (внешней средой). При $\alpha = 1$ система считается абсолютно открытой, а при $\alpha = 0$ — абсолютно закрытой.

Следует отметить, что в открытой системе общее приращение энтропии складывается из всегда

положительного приращения, обусловленного исключительно действием закона возрастания энтропии, и отрицательного приращения. Поэтому существует некоторый критический уровень упорядочения системы, которому однозначно соответствует степень открытости системы α . Если система организована ниже критического уровня, то в ней преобладают процессы, увеличивающие порядок, если выше — преобладают процессы дезорганизации.

Отсюда следует вывод, что размыкание системы приводит к ее упорядочению и самоорганизации, а замыкание — к дезорганизации. Однако, размыкая систему в целях ее самоорганизации, необходимо следить, чтобы интенсивность размыкания (скорость возрастания степени открытости системы) не превысила некоторого порога $\dot{\alpha}_{\text{крит}}$, выше которого система, не успев самоорганизоваться, потеряет устойчивость и разрушится.

В качестве примера управления синергетической открытостью системы рассмотрим задачу повышения открытости системы планирования крупного промышленного предприятия [9]. Известно [10], что важнейшей составляющей процесса управления производством является планирование. Его ведущая роль в принятии управленческих решений определяется тем, что в ходе планирования ставятся цели и распределяются ресурсы производственной системы. Рассматривать процесс планирования производства целиком не представляется возможным, поэтому выделяют уровни производственного планирования, которые характеризуются горизонтом планирования, периодом перепланирования и т. д. [10]. Процесс планирования может быть условно разбит на четыре уровня, характеризующихся собственным набором задач, различными периодами планирования и разными уровнями детализации [11]:

- **уровень управления предприятием (бизнес-планирование).** Рассматриваются стратегические задачи управления предприятием, определяются стратегические цели развития направлений производственной деятельности, распределяются ресурсы и инвестиции. Горизонт планирования на данном уровне составляет от одного года до пяти лет, а минимальный период перепланирования — один год;
- **уровень стратегического планирования.** Целью данного этапа планирования является определение долгосрочных и среднесрочных целей предприятия. На данном уровне происходит сбор информации: прогнозирование, фильтрация и отбор заказов, анализ существующих мощностей и бизнес-целей производства. Результатом комплексной работы всех участников процесса является построение главного календарного плана производства (ГКПП), который регламентирует "что?", "к какому сроку?" и "в каких количествах?" будет выпускаться в плановом периоде. Горизонт планирования данного уровня — от года до двух лет. Данный уровень подлежит

дальнейшей декомпозиции на подуровни, со своими горизонтами планирования и детализацией. Ключевым моментом является тот факт, что на выходе данного этапа планирования должен быть сформирован итвержден ГКПП с детализацией по месяцам. Минимальный период перепланирования на данном этапе составляет один месяц;

- **уровень тактического планирования.** На тактическом уровне планирования на основе составленного ГКПП с использованием более детальной информации о производственных мощностях строится детализированный календарный план производства в форме операционного плана, устанавливающий перечень, очередность и длительность технологических процессов (операций) на рабочих центрах в течение планового периода. Горизонт планирования — от одного до шести месяцев (в зависимости от длины производственного цикла предприятия и номенклатуры выпускаемой продукции). Детализация плана осуществляется по дням. Следует отметить, что используемый в стандарте MRPII¹ план потребности в материалах может быть получен автоматически из детализированного календарного плана производства. Минимальный период перепланирования обычно составляет одну неделю;
- **уровень оперативного планирования.** В качестве входных данных оперативное планирование использует детализированный календарный план выполнения производственных операций, полученный на тактическом уровне планирования. Затем составляется план операций на ближайшие часы или дни. Ввиду того что многие детали реального производственного процесса не рассматриваются или рассматриваются укрупненно на тактическом уровне планирования, а также в связи с тем, что из-за технологических или иных обстоятельств возникают отклонения от составленного календарного плана производства, необходимо проводить его корректировку и уточнение с учетом постоянно изменяющихся условий. Оперативное перепланирование плана операций также относится к данному уровню. Кроме того, к данному уровню можно отнести модели транспортных перевозок, ремонтных работ, складирования продукции и др. Горизонт планирования данного этапа — от одного дня до недели, детализация плана выполняется по часам. Минимальный период перепланирования — одна рабочая смена.

На рис. 3 представлена структурная схема системы производственного планирования, которая

¹ Стандарт MRP II (Manufacturing Resource Planning), разработанный в США, — это набор проверенных на практике разумных принципов, моделей и процедур управления и контроля, служащих повышению показателей экономической деятельности предприятия.



Рис. 3. Структурная схема системы производственного планирования

включает четыре уровня планирования: бизнес-планирование, стратегический, тактический и оперативный. Каждый уровень характеризуется горизонтом планирования Γ_i и периодом перепланирования γ_i , $i = 1, \dots, 4$. Внешним воздействием на данную систему считается воздействие со стороны заказчиков и рынков продукции, инноваций, сырья и труда.

Внутри системы планирования производства (СПП) также осуществляется взаимодействие. На стратегическом уровне формируется ГКПП, который является основой для тактического планирования и формирования операционного плана производства (ОПП). В свою очередь, ОПП является базой для составления сменно-суточных заданий (ССЗ). Как отмечалось выше, на оперативном уровне управления происходит контроль производства продукции и ее составляющих. В связи с тем что из-за технологических или иных обстоятельств возникают отклонения от составленных календарных планов, необходимо принимать меры для устранения отклонений в оперативном режиме. Обычно это влечет изменение операционного плана производства. Поэтому на рис. 3 показано обратное воздействие со стороны оперативного уровня на тактический уровень планирования.

Отметим, что результатом решения задачи производственного планирования на верхних уровнях управления предприятием является ГКПП на планируемый период, оптимальный с точки зрения критериев, определяемых политикой предприятия, и учитывающий ограничения на производственные мощности, имеющиеся оборотные средства и основные ресурсы предприятия [12]. В общем случае ГКПП — это календарный план выпуска продукции, с указанием объемов и сроков ее выпуска, разра-

батываемый для номенклатурных позиций верхнего уровня иерархии. В качестве таковых могут выступать как готовая продукция, так и сборочные единицы и узлы высокого уровня; как реально (физическими) существующие конфигурации продуктов, так и псевдоконфигурации, используемые лишь для целей планирования. ГКПП предоставляет основу для обоснованного обещания покупателям выполнения поставок в согласованные сроки, эффективного использования мощностей завода, достижения стратегических целей бизнеса в соответствии с планом производства, а также поиска компромиссов между маркетинговыми и производственными подразделениями предприятия [10]. Следует отметить, что ГКПП ориентирован в большей степени на увеличение прибыли предприятия и в меньшей степени — на комфортность производства. Он не учитывает распределение имеющихся ресурсов во времени и пространстве, возможности в поставках и хранении необходимых материалов, резервов для оперативного управления производством.

Возникающий конфликт должен быть разрешен на следующих структурных уровнях (тактическом и оперативном), на которых происходит детализация и уточнение ГКПП [13]. При этом возможные скорости внесения изменений в тактический и оперативный планы должны быть увязаны между собой и соответствовать степени открытости всей СПП. Другими словами, возможное изменение плана производства на стратегическом уровне, например, за счет включения новых заказов приводит к новому ГКПП. При этом должны произойти изменения на тактическом и оперативном уровнях планирования. Однако в силу нехватки ресурсов изменения на оперативном уровне не всегда могут быть осуществлены. Поэтому необходимо согласовать изменения календарных планов на двух последних уровнях планирования. Если эта корректировка возможна, то новый ГКПП является допустимым. В том случае, когда ресурсы на двух последних уровнях планирования не могут обеспечить новый ГКПП, необходимо пересмотреть скорость изменения этого плана. Другими словами, делая систему планирования более открытой за счет учета интересов потребителей на стратегическом уровне, необходимо следить, чтобы интенсивность размыкания (скорость возрастания степени открытости системы) не превысила некоторый порог $\alpha_{\text{крит}}$, выше которого система, не успев самоорганизоваться, потеряет устойчивость.

На практике степень открытости всей системы планирования на предприятии обычно подбирается эмпирически — путем введения процедуры согласования планов на трех последних уровнях. Эту процедуру согласования необходимо проводить до тех пор, пока СПП не перейдет в некоторое равновесное состояние, значение энтропии в котором будет соответствовать определенной степени открытости всей СПП, которая соответствует сущ-

ствующим ресурсам предприятия и удовлетворяет его менеджмент.

Однако любая модернизация СПП, направленная на повышение открытости системы, требует первоначального обоснования допустимой скорости реализации данного процесса в соответствии с имеющимися ресурсами предприятия и возможностями их структурной реорганизации и самоорганизации.

Введем параметр, характеризующий "гибкость" планирования на каждом структурном уровне СПП:

$$\beta_i = \frac{\gamma_i}{\Gamma_i}, i = 1, \dots, 4. \quad (11)$$

Отметим, что параметр β_i характеризует возможную скорость внесения изменений в i -й календарный план производства. Очевидно, что $\beta_i \in [0, 1]$. Если $\beta_i = 1$, то изменений в плане нет, а если $\beta_i = 0$, то изменения плана происходят практически мгновенно. В том случае, когда руководство предприятия стремится к большей открытости для внешних потребителей, то β_2 должно стремиться к нулю (как только приходит новый заказ на предприятие, так сразу корректируется ГКПП). Однако это влечет изменение в ОПП и ССЗ, т. е. β_3 и β_4 также должны стремиться к нулю, что обычно невозможно с позиций организации процесса производства. Другими словами, как уже отмечалось, параметры β_i должны быть согласованы между собой (например, $\beta_1 \geq \beta_2 \geq \beta_3 \geq \beta_4$). При этом очевидно, что данные параметры целесообразно выбирать примерно равными между собой, чтобы обеспечить их согласованность, не завышая производственные затраты. Следует отметить, что любое уменьшение параметров β_i связано с дополнительными издержками производства. Поэтому руководство предприятия стремится сохранять эти параметры как можно ближе к 1, т. е. реже прибегать к процедуре перепланирования производства.

Предположим, что на предприятии сложилась СПП, характеризующаяся некоторым распределением параметров β_i . Как показано выше, степень открытости системы однозначно определяет значение энтропии этой системы в равновесном состоянии. Отметим, что для абсолютно замкнутых систем значение энтропии будет максимальным, а для абсолютно открытых — минимальным. Требования рынка продукции обусловливают необходимость большей открытости и, соответственно, модернизации СПП. Для обеспечения устойчивого перехода СПП в новое равновесное состояние необходимо оценить степень открытости системы α . Для оценки α может быть предложена следующая формула:

$$\alpha = \beta_1(1 - \max_i \beta_i), i = 2, 3, 4. \quad (12)$$

Формула (2) показывает, что степень открытости системы определяется "гибкостью" календарного планирования, причем на самом "узком" уровне.

Введение множителя β_1 в формулу (12) позволяет учитывать масштаб предприятия и тип производства (машиностроительное, металлургическое и т. д.), т. е. учет параметра β_1 дает возможность учесть характер производственной деятельности предприятия при оценке степени открытости ее СПП.

При увеличении степени α открытость системы возрастает за счет поступления новой полезной информации, и энтропия снижается, а упорядоченность СПП повышается. Однако, если степень открытости будет очень высокой, например, информация о перепланировании будет поступать ежесуточно, то СПП не будет успевать подстраиваться, что приведет к дезорганизации всей системы управления. Поэтому для каждого конкретного производства необходимо обосновывать степень открытости СПП путем выбора оптимального значения α , которое зависит от большого числа параметров, характеризующих производство: номенклатуры и масштаба производства, вида применяемого оборудования, имеющихся производственных мощностей, используемых технологий и т. д.

Если в начальный момент модернизации СПП степень ее открытости равнялась α_0 , а требуется обеспечить степень открытости α_1 , причем $\alpha_1 > \alpha_0$, при этом должен возрасти критический уровень упорядочения системы, т. е. в СПП должны пройти процессы организации и самоорганизации, уменьшающие энтропию системы. Например, должно произойти расширение станочного парка предприятия или повышение его универсальности для увеличения "гибкости" производства на оперативном уровне управления (ликвидация "узких" мест), повышение квалификации рабочих и т. п.

Рассмотрим пример влияния распределения параметров β_i на степень открытости СПП. Пусть заданы следующие исходные данные:

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= 3 \text{ года}, \gamma_1 = 1 \text{ год}, \Gamma_2 = 1 \text{ год}, \gamma_2 = 3 \text{ месяца}, \\ \Gamma_3 &= 3 \text{ месяца}, \gamma_3 = 1 \text{ неделя}, \\ \Gamma_4 &= 1 \text{ неделя}, \gamma_4 = 3 \text{ дня}. \end{aligned}$$

По формуле (11) получим: $\beta_1 = 1/3$; $\beta_2 = 1/4$; $\beta_3 = 1/12$; $\beta_4 = 3/7$.

Используя формулу (12), можно оценить степень открытости данной СПП: $\alpha = 1/3(1 - 3/7) = 0,19$.

Видно, что рассматриваемая СПП с позиций энтропийного подхода:

1) не обладает согласованностью параметров ($\beta_4 > \beta_3$, $\beta_4 > \beta_2$), что обязательно вызовет конфликт между уровнем ГКПП и реализацией ССЗ, т. е. между требуемыми сроками выполнения заказов и возможностями производства;

2) степень открытости этой системы определяется гибкостью системы оперативного управления, которая в данном случае является "узким" местом системы управления производством;

3) система тактического планирования обладает чрезмерной "гибкостью", что приводит к необоснованным материальным затратам.

Для повышения степени открытости рассматриваемой СПП в целях более "гибкого" реагирования на пожелания заказчиков рассмотрим следующую оптимизационную задачу, которая является частным случаем задачи (7)–(10).

Пусть задана некоторая производственная система, характеризующаяся следующими параметрами СПП: $\beta_1 = 1/3$; $\beta_2 = 1/4$; $\beta_3 = 1/12$; $\beta_4 = 3/7$; $\alpha = 0,19$. Требуется найти минимальное время T , за которое можно повысить степень открытости данной системы на 50 %, при ограничениях на скорость изменения параметров $\dot{\beta}_i$, $i = 2, 3, 4$, т. е.:

$$|\dot{\beta}_i(t)| \leq \dot{\beta}_{ikrit}, \quad t \in [0, T], \quad i = 2, 3, 4.$$

Эти ограничения связаны с ресурсами предприятия, возможностями модернизации производства и т. п. При этом желательно, чтобы в момент времени T параметры β_i , $i = 2, 3, 4$, были приблизительно одинаковыми.

Предположим, что заданы следующие критические скорости изменения параметров системы планирования:

$$\dot{\beta}_{2\text{крит}} = 0,028; \dot{\beta}_{3\text{крит}} = 0,014; \dot{\beta}_{4\text{крит}} = 0,095,$$

которые соответствуют возможностям предприятия при модернизации системы управления за счет повышения гибкости производственного планирования.

Исходя из соотношения (12) можно записать:

$$\dot{\alpha}(t) = -\beta_1 \max_i |\dot{\beta}_i(t)| \operatorname{sign} \dot{\beta}_i(t), \\ t \in [0, T], \quad i = 2, 3, 4. \quad (13)$$

Предполагая монотонность по времени функций β_i , $i = 2, 3, 4$, и учитывая знак производных, из (3) следует, что $\dot{\alpha}(t) = \beta_1 \max_i \dot{\beta}_{ikrit}$, $i = 2, 3, 4$.

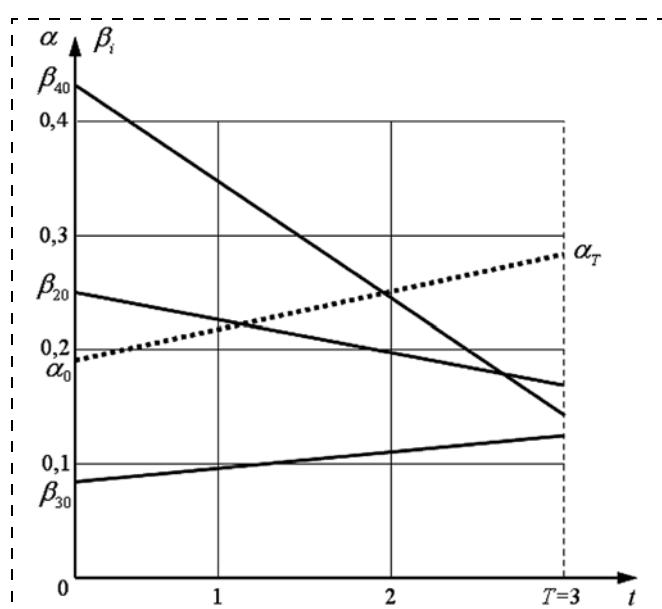


Рис. 4. Повышение степени открытости производственной системы за счет изменения параметров системы планирования

Из анализа исходных данных видно, что максимальное значение $\dot{\beta}_{ikrit}$ достигается при $i = 4$, т. е. $\dot{\alpha}(t) = \beta_1 \dot{\beta}_{4\text{крит}}$. Подставляя исходные данные, получим значение $\dot{\alpha} = 0,031$.

Теперь, подставляя это значение в выражение для требуемого значения параметра открытости системы в момент времени T ($\alpha_T = \alpha(T) = 0,19 + 1,5 = 0,285$), считая справедливым выражение $\alpha_T = \alpha_0 + \dot{\alpha} T$, ($\alpha_0 = 0,9$), получим минимальное время T , за которое можно повысить степень открытости системы до требуемого значения α_T :

$$T = (0,285 - 0,19)/0,031 = 3 \text{ (года).}$$

Следует отметить, что при такой скорости изменения открытости системы не произойдет никаких разрушительных процессов (вследствие выполнения ограничений на ресурсы предприятия). При этом в момент времени T параметры гибкости планирования примут следующие значения: $\beta_1 = 1/3$; $\beta_2 = 1/6$; $\beta_3 = 1/8$; $\beta_4 = 1/7$, которые близки к согласованным (рис. 4).

Для достижения этих параметров достаточно снизить γ_2 до 2 месяцев, значение γ_4 — до 1 рабочего дня и понизить горизонт планирования на тактическом уровне (Γ_3) до 2 месяцев.

Отметим, что в приведенном примере после модернизации СПП "узким" местом планирования вместо оперативного уровня становится стратегический, который определяет взаимодействие с заказчиками.

Другими словами, те обязательства, которые будут включены в ГКПП, предприятие способно выполнить за счет "гибкости" перепланирования на тактическом и оперативном уровнях управления производством.

Выводы

Рассмотренный синергетический подход к управлению организационно-техническими системами предполагает различную степень их открытости. Чем выше степень открытости системы, тем более готовой к самоорганизации должна быть эта система на всех структурных уровнях принятия управленческих решений. Предложен пошаговый алгоритм повышения синергетической открытости системы с выбором оптимального шага по времени с учетом ресурсов и рисков разрушения системы.

Приведен пример управления синергетической открытостью крупного промышленного предприятия. Показано, что одним из эффективных механизмов повышения степени открытости производственной системы является увеличение гибкости системы планирования производства. При этом структурные параметры системы на различных уровнях планирования должны быть согласованы между собой, что гарантирует возникновение нового равновесного состояния с уровнем организации производства, соответствующим стратегическим целям предприятия.

Список литературы

1. Солодова Е. А. Новые модели в системе образования: синергетический подход. М.: Книжный дом, 2012. 344 с.
2. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. М.: КомКнига, 2005. 296 с.
3. Хакен Г. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. М.: КомКнига, 2005. 248 с.
4. Трубецков Д. И. Введение в синергетику. М.: Едиториал УРСС, 2004. 240 с.
5. Горский Ю. М. Системно-информационный анализ процессов управления. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. 327 с.
6. Шаповалов В. И. Основы теории упорядочения и самоорганизации. М.: Фирма "Испо-Сервис", 2005. 296 с.
7. Федосеев С. А., Гитман М. Б., Столбов В. Ю., Вожаков А. В. Управление качеством продукции на современных промышленных предприятиях. Пермь: изд-во Перм. нац. исслед. ун-та, 2011. 229 с.
8. Гитман М. Б., Столбов В. Ю., Гильязов Р. Л. Управление социально-техническими системами с учетом нечетких предпочтений. М.: ЛЕНАНД, 2011. 272 с.
9. Pustovoit K. S., Gitman M. B., Stolbov V. Y. Widening the openness of a manufacturing system with consideration of internal and external customers' interests // Actual Problems of Economics. 2012. N. 8. P. 440–451.
10. Гаврилов Д. А. Управление производством на базе стандарта MRPII. СПб.: Питер, 2003. 352 с.
11. Евстратов С. Н., Вожаков А. В., Столбов В. Ю. Автоматизация планирования производства в рамках единой информационной системы многопрофильного предприятия // Автоматизация в промышленности. 2012. № 2. С. 13–16.
12. Производственный менеджмент: Учебник / Под ред. В. А. Козловского. М.: ИНФА-М, 2003. 574 с.
13. Федосеев С. А., Гитман М. Б., Столбов В. Ю. Математические модели управления качеством продукции на этапе планирования производства // Проблемы управления. 2011. № 4. С. 60–67.

An Algorithm for Control of the Synergetic Openness of the Organizational and Technical Systems

A. N. Danilov, dan@pstu.ru, V. Yu. Stolbov, ck@pstu.ru,

Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation

Received on January 27, 2015

The article is dedicated to the problem of control of the synergetic openness of the organizational and technical systems in a market economy. The degree of the synergetic openness of a system is an order parameter, which is defined as the system's ability to respond to the external stimuli (consumer demand) by self-organization. It is believed that the system's competitiveness depends on this parameter, but the functional dependency is not defined. The authors propose an incremental algorithm for a synergetic openness for the system control and other parameters of the order and rate of growth of openness. They present an example of application of the algorithm for the control of openness in the planning system of a large industrial enterprise. The task is to ensure control of the degree of openness of the hierarchical planning systems, since the control parameters are the periods of rescheduling at each hierarchical level of the decision-making. It was demonstrated that a higher transparency of the system's structural parameters required consistency at various planning levels. This ensured emergence of a new equilibrium state in the production system, which would meet the strategic objectives of an enterprise.

Keywords: synergetic openness, order parameters, degree of openness, control

For citation:

Danilov A. N., Stolbov V. Yu. An Algorithm for Control of the Synergetic Openness of the Organizational and Technical Systems, *Mekhanika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 6, pp. 387–395.

DOI: 10.17587/mau.16.387-395

References

1. Solodova E. A. Novye modeli v sisteme obrazovanija: sinergeticheskiy podhod (New models in the education system: a synergistic approach), Moscow, Knizhnyj dom, 2012, 344 p. (in Russian).
2. Prigozhin I., Stengers I. Porjadok iz haosa (Order out of chaos), Moscow, KomKniga, 2005, 296 p. (in Russian).
3. Haken G. Informacija i samoorganizacija. Makroskopicheskij podhod k slozhnym sistemam (Information and Self-Organization. Macroscopic Approach to Complex Systems), Moscow, KomKniga, 2005, 248 p. (in Russian).
4. Trubeckov D. I. Vvedenie v sinergetiku (Introduction to Synergetics), Moscow, Editorial URSS, 2004, 240 p. (in Russian).
5. Gorskiy Ju. M. Sistemno-informacionnyj analiz processov upravlenija (Systematic analysis and information management processes), Novosibirsk, Nauka, Sib. otd-nie, 1988, 327 p. (in Russian).
6. Shapovalov V. I. Osnovy teorii uporjadochenija i samoorganizacii (Fundamentals of the theory of ordering and self-organization), Moscow, Firma "Ispoto-Servis", 2005, 296 p. (in Russian).
7. Fedoseev S. A., Gitman M. B., Stolbov V. Ju., Vozhakov A. V. Upravlenie kachestvom produkcii na sovremenennyh promyshlenniyh predpriyatiyah (Quality management in modern enterprises), Perm', Publishing House of Perm National Research Polytechnic University, 2011, 229 p. (in Russian).

8. Gitman M. B., Stolbov V. Ju., Giljazov R. L. Upravlenie social'no-tehnicheskimi sistemami s uchetom nechetkih predpochtenij (Management of socio-technical systems with fuzzy preferences), Moscow, LENAND, 2011, 272 p. (in Russian).

9. Pustovoit K. S., Gitman M. B., Stolbov V. Y. Widening the openness of a manufacturing system with consideration of internal and external customers' interests, *Actual Problems of Economics*, 2012, no. 8, pp. 440–451.

10. Гаврилов Д. А. Управление производством на базе стандарта MRPII (Production management based on the standard MRPII), SPb, Piter, 2003, 352 p. (in Russian).

11. Евстратов С. Н., Вожаков А. В., Столбов В. Ю. Автоматизация планирования производства в рамках единой информационной системы многопрофильного предприятия // Автоматизация в промышленности, 2012, no. 2, pp. 13–16 (in Russian).

12. Козловского В. А. ed. *Производственный менеджмент: Учебник* (Production Management: A Textbook), Moscow, INFA-M, 2003, 574 p. (in Russian).

13. Fedoseev S. A., Gitman M. B., Stolbov V. Ju. Matematicheskie modeli upravlenija kachestvom produkciij na jetepe planirovaniya proizvodstva (Mathematical models of quality management in the planning phase of production), Problemy Upravlenija, 2011, no. 4, pp. 60–67 (in Russian).

Corresponding author:

Danilov Alexander N., Ph. D. in Technical Sciences, Assistant Professor, Assistant of the Vice-Rector on scholastic work, Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: dan@pstu.ru

Ю. В. Полищук, канд. техн. наук, доц., youra_polishuk@bk.ru,
Оренбургский государственный университет"

Мониторинг информационной энтропии в задачах описания больших технических систем

Рассмотрена задача мониторинга информационной энтропии больших технических систем, которая заключается в автоматизированном контроле количественной оценки информационной энтропии системы и позволяет сделать вывод о возможности принятия управлеченческих решений на основе хранящихся фактографических данных.

Ключевые слова: энтропия системы, квазиструктурированная информация, обработка электронных документов, управление, большие технические системы

Проблема информационной энтропии больших технических систем

Системный подход к комплексной автоматизации производственных процессов требует развития единой информационной теории управления [1]. Работы по ее созданию выполнялись под руководством академика Б. Н. Петрова, который в своих работах отмечал: "Энтропия характеризует неопределенность управления, т. е. его качество". Таким образом, потеря информации в автоматизированной системе не должна превышать определенной величины. В контексте настоящей работы рассмотрен вопрос количественной оценки энтропии больших технических систем (БТС).

Процесс эксплуатации БТС порождает необходимость принятия управлеченческих решений, которые характеризуются высокой сложностью процесса управления, появлением нестандартных эксплуатационных ситуаций, необходимостью адаптации процесса управления к возмущениям внешней среды, разноформатностью сопутствующего эксплуатационного контента (СЭК), включающего в себя всю информацию о состоянии БТС в виде электронной документации и формализованных фактографических данных, расхождениями между реальным состоянием управляемой системы и ее отображением в СЭК.

Принятие управлеченческих решений для БТС реализует группа лиц, принимающих решения (ГЛПР), на основе анализа фактографических данных, получаемых из СЭК. Необходимость участия ГЛПР в процессе принятия решений продиктована масштабом управляемой системы и сложностью процесса управления.

Сложность БТС, а также трудоемкость получения и обработки фактографических данных СЭК способствуют расхождению реального состояния управляемой системы и состояния, отраженного в СЭК. Последнее способствует повышению информационной энтропии БТС и принятию ГЛПР некорректных управлеченческих решений. Таким образом, принятие корректных управлеченческих решений для БТС допустимо только в случае соблюдения условия о допустимом значении информационной энтропии.

Задача квалиметрической оценки информационной энтропии на основе квазиструктурированных моделей эксплуатационного контента

В контексте данной работы под квалиметрической оценкой информационной энтропии будем понимать количественную оценку качества процесса управления с позиции полноты знаний о системе.

Фактографические данные о состоянии БТС поступают в единое хранилище СЭК в виде импульсных информационных потоков, которые представлены электронными документами с квазиструктурированным информационным наполнением, т. е. информацией, в которой можно выделить некую структуру, которая заранее целиком или частично неизвестна либо может меняться с течением времени [2].

По каждому информационному потоку поступает определенная фактографическая информация, представленная набором документов, как правило, через фиксированный интервал времени, который будем называть шагом импульса информационного потока. Шаг импульса информационного потока может изменяться во время эксплуатации БТС как по требованию ГЛПР, так и в связи с появлением нестандартных эксплуатационных ситуаций (например, внепланового ремонта, аварии или нехватки персонала и др.).

Получаемые из СЭК фактографические данные характеризуют состояние различных параметров БТС в определенный момент времени. Выделяют две основные категории параметров: статические и динамические. Для статических параметров время их получения от БТС не важно, так как их значения не меняются во времени. Динамические параметры характеризуются "устареванием", т. е. расхождением значения хранимого параметра и реального значения данного параметра в настоящий момент, что обусловлено изменениями значения параметра во времени. В зависимости от вида динамического параметра ГЛПР формирует функцию "устаревания" для данного параметра в зависимости от времени его существования.

На этапе проектирования БТС определяется такое число информационных потоков фактографиче-

ских параметров с заданными шагами импульсов, чтобы их знание с учетом их функций "устаревания" было достаточным для принятия корректных управлеченческих решений в любой момент времени. На практике при эксплуатации БТС возникает расхождение реального состояния управляемой системы и состояния, отраженного в СЭК. Данное расхождение затрудняет или делает невозможным для ГЛПР идентификацию реального состояния БТС в момент принятия решения.

Для примера рассмотрим диаграмму информационной энтропии установившегося процесса эксплуатации условного БТС (рис. 1, см. третью сторону обложки). Информация о состоянии условного БТС поступает в виде $N_{ИП}$ информационных потоков (ИП), которые отображены на двух верхних диаграммах рис. 1. По первому и последнему ИП в СЭК поступает информация о состоянии динамических параметров. Для информации по рассматриваемым ИП используются различные функции "устаревания", имеющие различный шаг импульса. Стоит отметить, что ИП вносят различный вклад в суммарную энтропию БТС, которая изображена на нижней диаграмме рис. 1. По остальным ИП 2, ..., $N_{ИП} - 1$ в СЭК поступает информация о состоянии статических параметров, которые не меняются с течением времени и поэтому вносят постоянный фиксированный вклад в суммарную энтропию БТС. На диаграмме суммарного ИП выделен пороговый уровень допустимой информационной энтропии, который определяет ГЛПР. В случаях, когда график суммарной информационной энтропии находится ниже допустимого уровня энтропии ГЛПР, в СЭК хранится достаточное количество актуальной информации для идентификации состояния БТС и принятия корректных управлеченческих решений, в противном случае требуется дополнительная информация о состоянии управляемой системы.

Таким образом, задача мониторинга информационной энтропии БТС заключается в автоматизированном контроле количественной оценки информационной энтропии системы.

Анализ рис. 1 (см. третью сторону обложки) позволяет сделать вывод о необходимости ускорения процессов обработки ИП, идентифицирующих состояние БТС, так как увеличение скорости обработки снижает значение суммарной энтропии системы. Трудоемкость обработки фактографической информации, поступающей по ИП, усложняется разноФорматностью и квазиструктурированностью контента поступающих документов. Решение задачи ускорения обработки данных может быть реализовано за счет применения универсального интерфейса доступа к фактографическим данным электронных документов.

Вероятность возможных состояний для БТС снижается при увеличении числа известных характеризующих систему параметров, а информационная энтропия определяется как логарифм отношения всех известных параметров к их теоретическому

числу с учетом весомости данных параметров, взятый со знаком минус [3]:

$$H_{\text{энтр}} = -\log_2 \frac{F_{\text{ст}}(P_{\text{ст}}, K_{\text{ст}}) + F_{\text{дин}}(P_{\text{дин}}, F_{\text{уст}}, K_{\text{дин}})}{F_{\text{ст}}(GP_{\text{ст}}(T_{\text{эксп}}), K_{\text{ст}}) + F_{\text{дин}}(GP_{\text{дин}}(T_{\text{эксп}}), F_{\text{уст}}, K_{\text{дин}})}, \quad (1)$$

где $F_{\text{ст}}$, $F_{\text{дин}}$ — функции, вычисляющие суммы произведений мощностей множеств статических и динамических (с учетом функции "устаревания") параметров на соответствующие весовые коэффициенты; $P_{\text{ст}}$, $P_{\text{дин}}$ — множества известных соответственно статических и динамических (с временем их существования) параметров системы; $K_{\text{ст}}$, $K_{\text{дин}}$ — множества весовых коэффициентов, соответствующих статическим и динамическим параметрам; $GP_{\text{ст}}$, $GP_{\text{дин}}$ — функции, генерирующие множества теоретически возможных соответственно статических и динамических параметров системы за указанный период; $T_{\text{эксп}}$ — время эксплуатации системы.

Для реализации универсального интерфейса доступа предложена математическая модель информационного наполнения документа:

$$S = \langle \text{root}, sObj, LObj, \text{minOccurs}, \text{maxOccurs}, sMet, Obj_smet \rangle, \quad (2)$$

где root — корневой объект, $\text{root} \in sObj$; $sObj$ — конечное множество объектов, каждый из которых содержит фрагмент информационного наполнения документа (текст, рисунок и т. д.) или выполняет роль контейнера для одного или нескольких объектов.

Для объектов-контейнеров доступны следующие метасвойства: $smet_c$ — определяет объект в качестве контейнера; $mixed$ — разрешает использование объектов-потомков в произвольном порядке. $LObj$ — отображение, определенное на множестве $sObj$, такое что $sObj \xrightarrow{LObj} \{obj_1, \dots, obj_n\}$, где $obj_i \in sObj$ — дочерний объект; n — число дочерних объектов; Obj_met — отображение, определенное на множестве $sObj$, такое что $sObj \xrightarrow{Obj_met} \{smet_c | smet_c, mixed | smet_1, \dots, smet_k\}$, где $smet_i \in sMet$ — метасвойство ограничения на содержимое объекта; minOccurs — функция, определяющая минимально возможное число раз использования объекта в модели; maxOccurs — функция, определяющая максимально возможное число раз использования объекта в модели.

Рассмотрим графическое представление электронного документа (рис. 2).

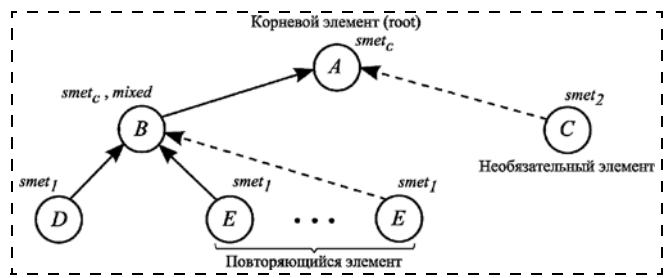


Рис. 2. Граф информационного наполнения документа

Документ, представленный на рис. 2, состоит из пяти объектов. Объект А выполняет роль контейнера для объектов В и С, объект В выполняет роль контейнера для объектов Д и Е. Объекты А, В, Д обязательно должны быть использованы при разработке документа, объект С является необязательным к использованию, объект Е в рассматриваемом примере должен быть использован от трех до пяти раз. Объекту-контейнеру А соответствует метасвойство ограничения $smet_c$, а для объекта-контейнера В определено дополнительно метасвойство *mixed*. Объект С представлен числовым наполнением, т. е. ему соответствует метасвойство ограничения $smet_2$. Объекты D, E имеют символьное информационное наполнение, которому соответствует метасвойство ограничения $smet_1$.

Документ может быть представлен с помощью модели следующим образом: $root = \{A\}; sObj = \{A, B, C, D, E\}; LObj(A) = \{B, C\}, LObj(B) = \{D, E | E, D\}, LObj(C) = \{\}, LObj(D) = \{\}, LObj(E) = \{\}; Obj_smet(A) = \{smet_c\}, Obj_smet(B) = \{smet_c, mixed\}, Obj_smet(C) = \{smet_2\}, Obj_smet(D) = \{smet_1\}, Obj_smet(E) = [smet_1]; minOccurs(A) = 1, maxOccurs(A) = 1; minOccurs(B) = 1, maxOccurs(B) = 1; minOccurs(C) = 0, maxOccurs(C) = 1; minOccurs(D) = 1, maxOccurs(D) = 1; minOccurs(E) = 3, maxOccurs(E) = 5.$

Применение единой квазиструктурированной модели информационного наполнения к коллекции однотипных документов реализует маркировку фактографических данных, расположенных непосредственно в документах. Таким образом, не происходит дублирование данных и извлечение их из документа-первоисточника. Последнее снижает риск появления ошибок. Разметка содержимого может выполняться в автоматизированном режиме на основе уже размеченных аналогичных документов [4]. Способ синтеза моделей данного вида рассмотрен в работе [5].

Реализация квазиструктурированных моделей информационного наполнения на основе XML-формата реализует универсальный интерфейс доступа к фактографическим данным разноформатных электронных документов и повышает скорость обработки их контента [6].

Практическое решение задачи оценки информационной энтропии

В качестве примера выполним квадратическую оценку информационной энтропии коллекторно-лучевой системы сбора продукции (КСС) газоконденсатного месторождения [7]. Данная разновидность систем сбора продукции применяется на Оренбургском газоконденсатном месторождении (ОГКМ), которое эксплуатируется с 1974 г. и в данный момент находится на этапе падающей добычи [8].

КСС состоит из скважин, которые рассматриваются как отдельные системы, их контуры влияния могут пересекаться, а движение продукции по

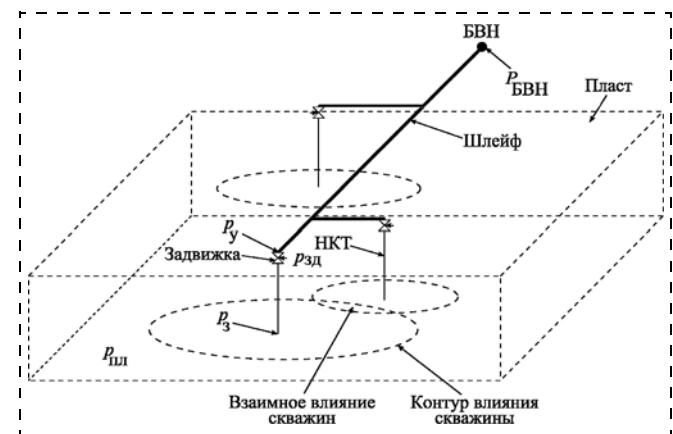


Рис. 3. Схема коллекторно-лучевой системы сбора продукции с тремя скважинами

шлейфу в некоторых случаях приводит к задавливанию скважин. Таким образом, границами системы являются газоносный пласт и блок входных нитей (БВН).

Рассмотрим КСС совместно с насосно-компрессорными трубами (НКТ) и контурами влияния скважин. На рис. 3 показана схема наиболее распространенной в условиях ОГКМ КСС, обеспечивающей сбор продукции с трех скважин.

Продукция поступает к забою скважины из пласта, где находится под пластовым давлением $p_{пл}$. При движении к забою скважины происходит снижение давления до значения p_3 (забойное давление). Таким образом, в границах контура влияния скважины образуется депрессионная воронка [9]. Далее продукция попадает в НКТ, по которым поднимается от забоя скважины до КСС, где на входе установлены регулирующие и снижающие давление до значения p_y (устьевое давление) задвижки с местным сопротивлением $p_{зд}$. При перемещении продукции по КСС давление в шлейфах падает, а в тройниках выравнивается по двум направлениям. При дальнейшем движении по шлейфу падение давления позволяет продукции попадать на БВН с давлением, заданным технологическим режимом.

Границы рассматриваемой системы задаются известными статическими давлениями газа: пластовое давление $p_{пл}$ определяется геологией продуктивного пласта, а уравнение на блоке входных нитей p_{BVN} — технологическим режимом эксплуатации месторождения. Таким образом, внутренней характеристикой рассматриваемой системы является давление газа [10]. Установив его на границах участков КСС, найдем все ее параметры.

Основными элементами системы, кроме пласта и БВН, являются: забои скважин, НКТ, соединительные трубопроводы (нити) и тройники. Пласт, забой скважины, БВН и тройники характеризуются значениями статических давлений, а трубопроводы и НКТ — падениями статических давлений между границами участков, которые определены посто-

янными значениями множества конструктивно-технологических параметров.

Потери статического давления при движении потока от газоносного пласта до БВН происходят в трех зонах: при забойной зоне скважин, подъеме газа на поверхность и трении его о стенки ствола, в трубопроводе [11]. Для принятия корректных управляющих воздействий на КСС должны быть установлены все конструктивные параметры скважин и шлейфов из состава системы, например, внутренние диаметры труб, рельеф шлейфов и т. д. Несмотря на длительный период эксплуатации месторождения, перечисленные параметры известны в полном объеме не для всех КСС из состава ОГКМ. Рассмотренные параметры относятся к категории статических и характеризуют полноту знаний о состоянии системы.

В качестве динамических параметров данной системы, определяющих полноту знаний о ней, рассмотрим пластовые, забойные и устьевые давления, а также значения дебитов газа, конденсата и воды для всех скважин из состава КСС. Значения пластовых и забойных давлений ГЛПР получает из результатов гидродинамических исследований скважин (ГИС), проведение которых дает понимание состояния скважин. В условиях ОГКМ ГИС должны выполняться не реже одного раза в квартал для каждой скважины из состава КСС. Значения дебитов и устьевых давлений принимают по результатам геолого-технологического отчета, который в условиях ОГКМ формируется в конце каждого месяца. В качестве функции "устаревания" для всех динамических параметров используем экспоненциальную зависимость от времени их существования, на основе которой строятся кривые падения главных эксплуатационных показателей ОГКМ. Масштаб функции "устаревания" зависит от скорости изменения состояния конкретной БТС.

Для КСС функцию "устаревания" запишем в виде

$$F_{\text{уст}} = \exp(-\sqrt{T}), \quad (3)$$

где T — число календарных месяцев с момента получения значения динамического параметра.

Таким образом, если значение динамического параметра получено в текущем месяце ($T = 0$), то функция "устаревания" для него $F_{\text{уст}} = 1$. Учет снижения значимости для динамических параметров БТС реализуется путем умножения значения веса параметра на значение функции "устаревания".

Стоит отметить, что в условиях эксплуатации БТС

фактическое известное число параметров системы, как правило, меньше теоретического. Например, в условиях ОГКМ ГИС должны выполняться не реже одного раза в квартал для каждой скважины из состава КСС, но необходимость обеспечения заданного объема добычи газа на месторождении не позволяет проводить данные исследования в полном объеме, так как на время проведения исследований от скважины не поступает продукция. Конструктивные параметры КСС ОГКМ также известны не в полном объеме.

Процесс обработки ГИС осложнен разноформатностью и квазиструктурированностью контента поступающих документов, что обусловлено отсутствием требований к формату и контенту документов данного вида. Дополнительную сложность вносит тот факт, что ГИС в условиях ОГКМ выполняют несколько подрядных организаций. В результате документы ГИС поступают в форматах MS Word или MS Excel с квазиструктурированным содержанием. Эффективным решением перечисленных проблем является применение единой квазиструктурированной модели информационного наполнения (2) к коллекции однотипных документов.

Пример фрагмента электронного документа с информацией о результатах выполненных гидродинамических исследований на газовой скважине формата MS Word с размеченными фактографическими данными изображен на рис. 4. Модель документа ГИС подробно рассмотрена в работе [4].

В результате разметки содержимого электронного документа реализуется доступ к фактографическому содержимому его контента в автоматизированном режиме. Аналогично обрабатываются все соответствующие документы, поступающие в СЭК от БТС.

Для квалиметрической оценки информационной энтропии КСС будем использовать формулу (1)

Выполненный комплекс ГИС:							
Дата	Вид исследования	Режим исследования	Время замера	Интервал исследования, м	Руст, МПа	Рзатр, МПа	
Нач.	Кон.	Нач.	Кон.		Нач.	Кон.	Нач.
4 RunCom	« VidIsI » ННК ГК VidIsI »	« RegIsI » статика длительная RegIsI »	TimeBZam 2 1:20 TimeEZam 2 2:50	« IntIsI » 1250- 1560 IntIsI »	« DavUs » 0 DavUstB DavUstE	« DavUs » 0 DavZatB DavZatE RunCom	« DavZat » 0 DavZatB DavZatE
« Data » 04.09 Data »							
Тип прибора	Дата эталонировки	Начальник партии					
« Pribor » TypeP ГЕОТ РОН № 18 TypeP »	« DataEt » 05.07.2006 DataEt »	DirPart « Соков В.Ю. » Pribor »					
Результаты ГИС:							
Result (Res) По данным нейтрон-нейтронного каротажа, газовые скопления за НКТ под пакером отмечаются в интервале 1303.8-1346 м, в интервале 1538-1556 м - газовый "пузырь". По сравнению с замером от 22.08.06 их положение не изменилось (см. прил.)							

Рис. 4. Фрагмент электронного документа MS Word с размеченными фактографическими данными

с учетом функции "устаревания" (3) для ее динамических параметров. Таким образом, для КСС с полностью неизвестными параметрами информационная энтропия равна "стартовой энтропии", а для КСС с полностью известными параметрами — "0". Значение "стартовой энтропии" зависит от теоретического числа параметров описания БТС с учетом весомости данных параметров.

Предлагаемые значения весовых коэффициентов для статических и динамических параметров КСС представлены в табл. 1 и 2 соответственно.

Для большинства КСС известны конструктивные (статические) параметры скважин и шлейфа, за исключением рельефа шельфа. По этой причине они сгруппированы и представлены двумя параметрами. Значения весов данных параметров объясняются их важностью. Отсутствие знания значений рассмотренных параметров препятствует моделированию КСС, а влияние рельефа учитывается в случаях эксплуатации обводненных скважин. Значения дебита газа, конденсата, воды и устьевого давления скважин получают ежемесячно из одного документа. Поэтому их состояние можно характеризовать одним параметром. В качестве оставшихся динамических параметров для скважин выбраны значения пластовых и забойных давлений. Трудоемкость получения пластового давления выше, чем забойного, что обусловлено геологическими особенностями продуктивных пластов ОГКМ. Для получения пластового давления необходимо дождаться полного восстановления давления в забое

Значения весовых коэффициентов для статических параметров КСС

Параметр	Весовой коэффициент
Конструктивные параметры скважин КСС и шлейфа (за исключением его рельефа)	30
Рельеф шлейфа	20

Таблица 1

Значения весовых коэффициентов для динамических параметров КСС

Параметр	Весовой коэффициент
Дебиты газа, конденсата, воды и устьевое давление скважины	1
Пластовое давление скважины	10
Забойное давление скважины	3

Таблица 2

Результаты квалиметрической идентификации КСС

Информационная энтропия	KCC1	KCC2
Без учета статических параметров	0,624 256 556	0,490 918 525
С учетом статических параметров	0,164 869 019	0,711 980 080

Таблица 3

скважины, что требует более длительной остановки скважины.

Таким образом, при определении значений весовых коэффициентов учитывалась их значимость при моделировании КСС и трудоемкость их получения.

Проведем квалиметрическую оценку информационной энтропии двух схожих по характеристикам КСС, в состав которых входят по три скважины. Рассмотрим период их эксплуатации, начиная с июня 1988 г. по настоящий момент. В обозначенный период конструкции шлейфов и скважин КСС не подвергались модификациям, т. е. система сбора функционировала в установленном режиме. Задвижки, размещенные на устьях скважин, находились в полностью открытом состоянии в обеих системах сбора продукции. Определим названия для систем сбора: KCC1 и KCC2, для которой отсутствует информация о рельефе шлейфа. Результаты идентификации данных КСС представлены в табл. 3.

Анализ результатов, представленных в табл. 3, позволяет сделать следующий вывод: KCC2 обладает меньшим значением информационной энтропии без учета статических параметров, что обусловлено регулярными ГИС по всем ее скважинам в конце рассматриваемого периода, но при учете статических параметров значение ее энтропии больше, чем у KCC1, в связи с отсутствием информации о рельефе шлейфа скважин. Полученный результат дает возможность ГЛПР оценить уровень информационной энтропии всех рассматриваемых систем, что позволяет реализовать возможность синтеза допустимого порогового значения. Соблюдение допустимого значения энтропии для БТС снижает вероятность принятия некорректных управляемых воздействий, обусловленных расхождениями между реальным и отраженным в эксплуатационной документации состояниями. В качестве порогового значения выбирается среднее значение энтропии для анализируемых систем в определенный момент времени. Пороговое значение энтропии подвергается корректировке со стороны ГЛПР в зависимости от оперативной обстановки на БТС.

Заключение

Рассмотренный способ мониторинга информационной энтропии БТС на основе квазиструктурированных моделей эксплуатационного контента повышает эффективность принятия управлений решений за счет автоматизированной оценки полноты знаний о системе, а использование квазиструктурированных моделей информационного наполнения повышает эффективность обработки разноформатных документов с квазиструктурированным контентом.

Список литературы

- Петров Б. Н. Избранные труды. Т. 1. Теория автоматического управления. М.: Наука, 1983. 432 с.

2. Палей Д. Моделирование квазиструктурированных данных // Открытые системы. 2002. № 9. С. 57–64.
3. Полищук Ю. В. Квалиметрическая идентификация больших и сложных технических систем по сопутствующему эксплуатационному контенту // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2014. № 6. С. 34–38.
4. Полищук Ю. В., Ларин А. В. Автоматизация процесса разметки управленческого контента электронных документов с квазиструктурированным информационным наполнением на основе паттернов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2013. № 3. С. 55–60.
5. Полищук Ю. В., Черных Т. А. Синтез квазиструктурированных моделей информационного наполнения электронных документов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2012. № 6. С. 20–27.
6. Хабибуллин И. Самоучитель XML. М.: Книга по Требованию, 2012. 333 с.
7. Волков Н. М., Михеев А. П., Колев К. А. Справочник работника газовой промышленности. М.: Недра, 1989. 296 с.
8. Нургалиев Д. М. Повышение надежности газопроводов сероводородсодержащего газа ОГКМ в период падающей добычи углеводородного сырья: Автореферат канд. тех. наук. Уфа, 2002. 17 с.
9. Коротаев Ю. П., Тагиев В. Г., Гергедава Ш. К. Системное моделирование оптимальных режимов эксплуатации объектов добычи природного газа. М.: Недра, 1989. 264 с.
10. Закиров С. Н. и др. Новые принципы и технологии разработки месторождений нефти и газа. М.: Недра, 2004. 520 с.
11. Ермилов О. М., Ремизов В. В., Ширковский А. П., Чугунов Л. С. Физика пласта, добыча и подземное хранение газа. М.: Наука, 1996. 541 с.

Monitoring of the Information Entropy for the Description of Large Technical Systems

Yu. V. Polishchuk, Youra_Polishuk@bk.ru,
Orenburg State University, Orenburg, 460018, Russian Federation

Received on January 17, 2015

The complexity of control of large technical systems coupled with the time-consuming process of obtaining and processing of the factual data from the operational documentation contributes to the situation with discrepancies in the real state of the system and the status reflected in the documentation. This reduces the information entropy of the system and the number of incorrect management decisions. Thus, adoption of control solutions for large and complex technical systems is only possible, if they meet the conditions of the admissible value of the entropy. The task of monitoring of the information entropy of large complex technical systems should be solved with an automated control of quantifying the information entropy of the system, which leads to conclusion about a possibility of making control solutions based on the stored factual data. The paper describes the method of a qualimetric evaluation of the information entropy of large technical systems based on operational models of a semistructured content. This method is based on an automated analysis of a group of decision-makers of the factual content associated with the operational documentation generated during operation of the identified system. Use of the semistructured content model implements a universal interface with access to the factual data of the electronic documents, which reduces the number of the processing errors and increases the processing speed of the factual content. The latter reduces the total information entropy of the driven system.

Keywords: entropy of a system, semistructured data, electronic documents processing, control, large technical systems

For citation:

Polishchuk Y. V. Monitoring of the information entropy for the description of large technical systems, *Mekhanika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 6, pp. 396–401.

DOI: 10.17587/mau.16.396-401

References

1. Petrov B. N. *Izbrannyye trudy. Tom. 1. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* (Selected Works. V. 1. Automatic Control Theory), Moscow, Nauka, 1983, 432 p. (in Russian).
2. Palej D. Modelirovanie kvazistrukturirovannyh dannyy (Modeling semistructured data), *Otkrytye Sistemy*, 2002, no. 9, pp. 57–64 (in Russian).
3. Polishhuk Ju. V. Kvalimetriceskaja identifikacija bol'shih i slozhnyh tehnicheskikh sistem po sопutstvujushhemu jekspluatacionnomu kontentu (Qualimetric identification of large and complex technical systems associated operational content), *Vestnik Komp'juternyh i Informacionnyh Tehnologij*, 2014, no. 6, pp. 34–38 (in Russian).
4. Polishhuk Ju. V., Larin A. V. Avtomatizacija processa razmetki upravlencheskogo kontenta jeklektronnyh dokumentov s kvazistrukturirovannym informacionnym napolneniem na osnove patternov (Automating the process of marking the content management of electronic documents with semistructured content based on patterns), *Vestnik Komp'juternyh i Informacionnyh Tehnologij*, 2013, no. 3, pp. 55–60 (in Russian).
5. Polishhuk Ju. V., Chernykh T. A. Sintez kvazistrukturirovannyh modeley informacionnogo napolnenija jeklektronnyh dokumentov (Synthesis semistructured content model of electronic documents), *Vestnik Komp'juternyh i Informacionnyh Tehnologij*, 2012, no. 6, pp. 20–27 (in Russian).
6. Habibullin I. Samouchitel' XML (Teach yourself XML), Moscow, Kniga po Trebovaniyu, 2012, 333 p (in Russian).
7. Volkov N. M., Miheev A. P., Kolev K. A. Spravochnik rabotnika gazovoj promyshlennosti (Directory of gas industry workers), Moscow, Nedra, 1989, 296 p. (in Russian).
8. Nurgaliев Д. М. Povyshenie nadezhnosti gazoprovodov serovodorodo-soderzhashhego gaza OGKМ v period padajushshej dobychi uglevodorodnogo syr'ja: Avtoreferat kand. teh. nauk, Ufa, 2002, 17 p. (in Russian).
9. Korotaev Ju. P., Tagiev V. G., Gergedava Sh. K. Sistemnoe modelirovaniye optimal'nyh rezhimov jekspluataci ob'ektov dobychi prirodnoy gaza (System modeling optimum operation of natural gas facilities), Moscow, Nedra, 1989, 264 p. (in Russian).
10. Zakirov S. N. i dr. Novye principy i tekhnologii razrabotki mestorozhdenij nefti i gaza (New principles and technologies to develop oil and gas fields), Moscow, Nedra, 2004. 520 p. (in Russian).
11. Ermilov O. M., Remizov V. V., Shirkovskij A. I., Chugunov L. C. Fizika plasta, dobycha i podzemnoe hranenie gaza (Physics of the reservoir, production and underground gas storage), Moscow, Nauka, 1996, 541 p. (in Russian).

Corresponding author:

Polishchuk Yury V., PhD, Associate Professor of Computer Security mathematical software and information systems of Orenburg State University, Orenburg, 460018, Russian Federation.
e-mail: Youra_Polishuk@bk.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

УДК 681.5.013

Е. В. Чичерова, инженер-конструктор, e-mail: proffgrand@mail.ru,
Открытое Акционерное Общество "Климов", г. Санкт-Петербург

Способы повышения качества управления частотой вращения силовой турбины газотурбинного двигателя

Обсуждаются вопросы повышения качества управления частотой вращения силовой турбины газотурбинного двигателя с помощью электронных регуляторов различных типов. Рассматриваются регуляторы со статическим и переменным коэффициентом усиления, квадратичный и нечеткий логический регуляторы. Проводится исследование качества динамических процессов и запасов устойчивости системы при работе каждого из регуляторов. По результатам анализа выбирается структура регулятора, обеспечивающая наилучшее качество управления частотой вращения силовой турбины.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, силовая турбина, линейный регулятор, квадратичный регулятор, нечеткий логический регулятор, регулятор с переменным коэффициентом усиления

Введение

Газотурбинный двигатель (ГТД) представляет собой сложную термогазодинамическую систему со множеством особенностей, которые необходимо учитывать при проектировании системы автоматического управления (САУ). САУ современного авиационного двигателя выполняет множество функций. Эти функции распределены и осуществляются цифровым регулятором и гидромеханическими исполнительными механизмами.

Основную часть функций по управлению двигателем выполняет цифровой регулятор. В его задачи входит управление режимами работы ГТД, поддержание и/или ограничение различных параметров, диагностика и контроль состояния двигателя и элементов САУ и обеспечение сервисно-информационных функций. В задачу гидромеханической части САУ входит управление механизацией двигателя по командам цифрового регулятора и управление работой ГТД по упрощенным законам в случае отказа электронной системы.

От качества настройки электронных алгоритмов во многом зависит качество управления параметрами двигателя. Часто в электронных системах управления ГТД используются линейные регуляторы П, ПД, ПИ и ПИД типа. Их популярность объясняется простотой математического описания, дешевизной реализации и достаточной эффективностью. Однако, как показывает практика, в рамках линейной теории не всегда удается настроить ПИД регулятор для обеспечения требуемого качества переходных процессов в нелинейной системе. При управлении сложными нелинейными объектами, каким является ГТД, такие регуляторы не всегда могут обеспечить требуемое качество управления

его параметрами, устойчивость и робастность системы при изменениях условий эксплуатации и возникновении отказов. В этом случае имеет смысл применять альтернативные нелинейные регуляторы. Например, это может быть регулятор с переменным коэффициентом усиления, квадратичный регулятор или нечеткий логический регулятор (НЛР), обладающий свойством робастности.

Проведем исследование качества переходных процессов и запасов устойчивости контура поддержания частоты вращения силовой турбины ГТД с перечисленными регуляторами.

Описание контура поддержания частоты вращения силовой турбины

Основной задачей САУ вертолетного двигателя является поддержание частоты вращения несущего винта n_{HB} . Эта задача выполняется путем управления частотой вращения силовой турбины (СТ) n_{CT} через требуемый расход топлива G_t , который зависит от частоты вращения ротора турбокомпрессора (ТК) n_{TK} и ее производной $\dot{n}_{TK_треб}$. В зависимости от режима работы двигателя требуемую производную частоты вращения ротора ТК формируют различные контуры. Например, на режиме "Малый Газ" значение $\dot{n}_{TK_треб}$ определяется контуром поддержания требуемой частоты вращения ротора турбокомпрессора, а на режиме "Полет" — контуром поддержания частоты вращения силовой турбины.

Поскольку на режиме "Полет" двигатель может эксплуатироваться значительную часть времени, то от выбора структуры и параметров электронного регулятора зависит динамическое качество управления ГТД и его ресурс.

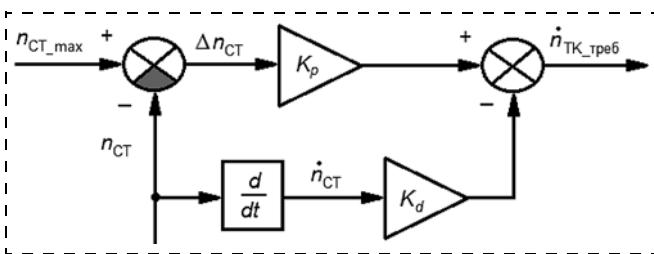


Рис. 1. Структурная схема контура поддержания частоты вращения силовой турбины с линейным электронным регулятором

На рис. 1 представлена типовая схема контура поддержания частоты вращения силовой турбины ГТД с линейным ПД регулятором.

На вход контура подается ошибка рассогласования между текущим и требуемым значением частоты вращения СТ Δn_{CT} и производная текущей частоты вращения СТ \dot{n}_{CT} . Выходным сигналом является требуемая производная частоты вращения ротора ТК.

Выражение, описывающее контур поддержания частоты вращения СТ с линейным ПД регулятором, имеет вид

$$\dot{n}_{TK_треб_n_{CT}} = \Delta n_{CT} K_p + \dot{n}_{CT} K_d. \quad (1)$$

Коэффициенты усиления пропорционального K_p и дифференциального K_d звеньев определяются из следующих уравнений:

$$K_p = K(\Delta n_{CT}) K_{\text{стат_}p} G_{T_стат}(n_{TK}) a_{13}(n_{TK}), \quad (2)$$

$$K_d = K_{\text{стат_}d} T_{CT}(n_{TK}). \quad (3)$$

Здесь $G_{T_стат}(n_{TK})$ — характеристика статического расхода топлива; $a_{13}(n_{TK})$ — коэффициент линейно-динамической модели двигателя по расходу топлива; $T_{CT}(n_{TK})$ — постоянная времени ротора силовой турбины.

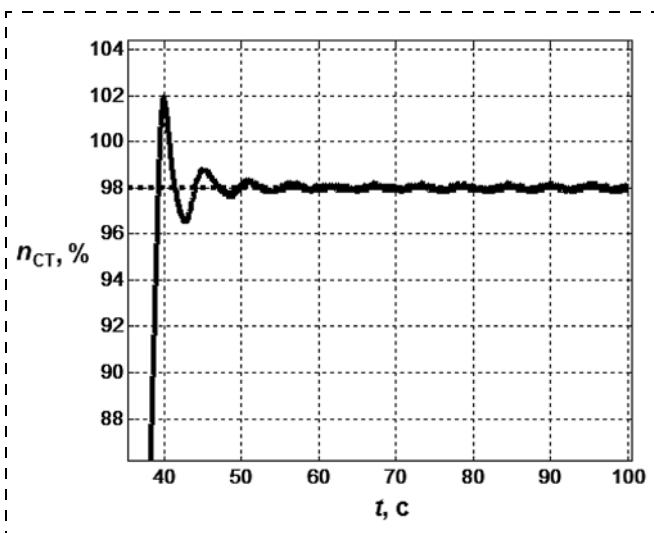


Рис. 2. Переходный процесс по частоте вращения силовой турбины при работе двигателя на режиме "Полет" с линейным ПД регулятором контура поддержания частоты вращения силовой турбины

Коэффициент $K(\Delta n_{CT})$ задается следующей системой уравнений:

$$K(\Delta n_{CT}) = \begin{cases} |\Delta n_{CT}|, & |\Delta n_{CT}| \leqslant 1; \\ 1 + 0,5(\Delta n_{CT} - 1), & 1 < \Delta n_{CT} \leqslant 3; \\ 2 + (2/7)(\Delta n_{CT} - 3), & \Delta n_{CT} > 3. \end{cases} \quad (4)$$

Статический коэффициент пропорционального звена $K_{\text{стат_}p}$ равен 0,35, а статический коэффициент дифференциального звена $K_{\text{стат_}d}$ составляет 0,05.

На рис. 2 представлен график переходного процесса по частоте вращения СТ при работе одного двигателя на режиме "Полет" с линейным ПД регулятором.

Из рис. 2 видно, что выход на режим сопровождается забросом порядка 4 %. Амплитуда незатухающих колебаний составляет 0,2 %. Время переходного процесса — около 20 с.

Проведем анализ альтернативных способов регулирования, позволяющих повысить запасы устойчивости исследуемой системы и устраниТЬ колебания. Рассмотрим следующие регуляторы: ПД регулятор с уменьшенным пропорциональным коэффициентом усиления, квадратичный регулятор, регулятор с переменным коэффициентом усиления, нечеткий логический регулятор пропорционального типа и нечеткий регулятор с пропорциональным коэффициентом усиления и корректирующим дифференциальным звеном.

Линейный ПД регулятор с уменьшенным пропорциональным коэффициентом усиления

Рассмотрим переходную характеристику по частоте вращения силовой турбины при работе линейного ПД регулятора с уменьшенным пропорциональным коэффициентом усиления (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что уменьшение пропорционального коэффициента усиления обеспечивает апериод-

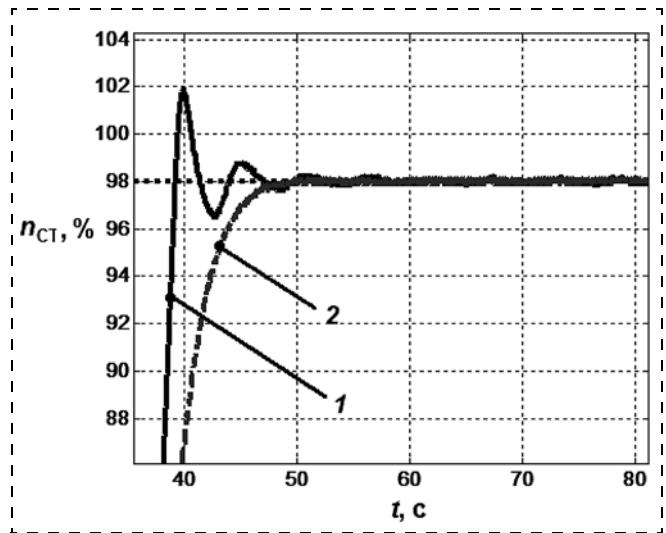


Рис. 3. Характеристика переходного процесса по частоте вращения силовой турбины при работе исходного ПД регулятора (1) и ПД регулятора с уменьшенным пропорциональным коэффициентом усиления (2). Фрагмент

дический характер переходного процесса, повышает запасы устойчивости системы (отсутствие забросов, колебаний) при сохранении высокой статической точности, обеспечивает более высокое быстродействие системы по сравнению с исходным ПД регулятором (порядка 15 с). Однако требуется обеспечить более высокое быстродействие системы (порядка 8...10 с). Данное требование обосновано тем, что электронный регулятор поддержания частоты вращения СТ должен компенсировать инерционность СТ. В связи с этим исследуем эффективность применения нелинейных регуляторов.

Квадратичный регулятор

Квадратичный регулятор описывается выражением вида

$$\dot{n}_{\text{TK_треб_}n_{\text{CT}}} = \Delta n_{\text{CT}}^2. \quad (5)$$

Переходная характеристика по частоте вращения СТ при работе квадратичного регулятора представлена на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что переходный процесс по частоте вращения СТ сопровождается забросом и колебаниями. Такой регулятор не обеспечивает требуемого запаса устойчивости системы. В связи с этим рассмотрим нелинейные регуляторы.

Регулятор с переменным коэффициентом усиления

Данный регулятор разбивает область управления на пять структур ($\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$), каждая из которых представляет собой линейный коэффициент усиления.

Закон управления регулятора имеет вид

$$\dot{n}_{\text{TK_треб_}n_{\text{CT}}} = \Psi \Delta n_{\text{CT}}, \quad (6)$$

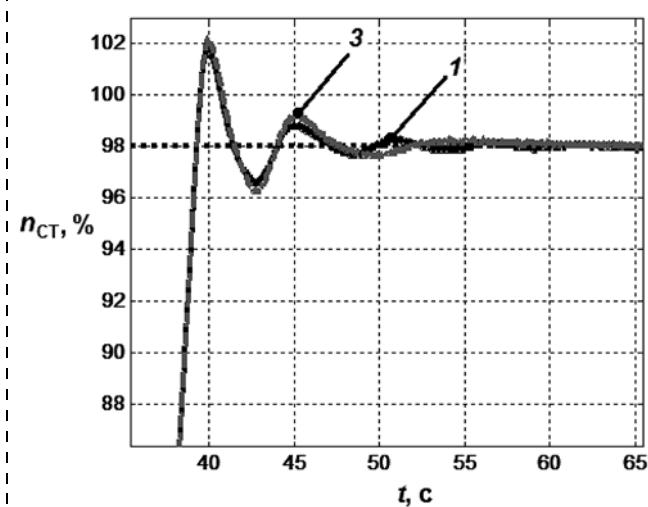


Рис. 4. Характеристика переходного процесса по частоте вращения силовой турбины при работе исходного ПД регулятора (1) и квадратичного регулятора (3). Фрагмент

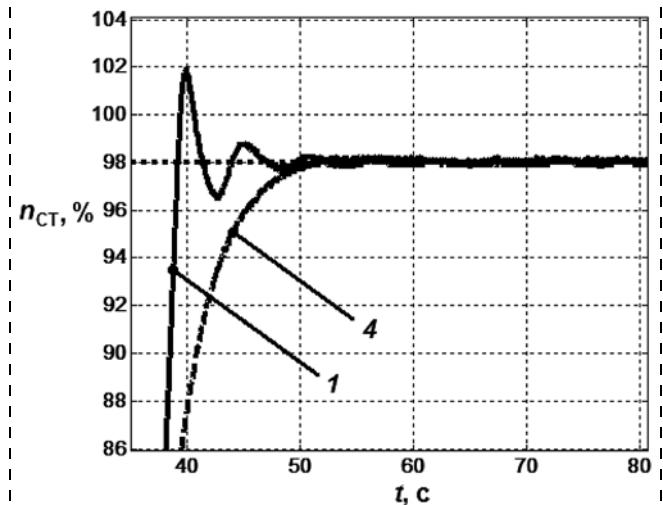


Рис. 5. Характеристика переходного процесса по частоте вращения силовой турбины при работе исходного ПД регулятора (1) и регулятора с переменным коэффициентом усиления (4). Фрагмент

где Ψ определяется следующим образом:

$$\Psi = \begin{cases} \alpha, |\Delta n_{\text{CT}}| > 30; \\ \beta, 20 < |\Delta n_{\text{CT}}| \leq 30; \\ \gamma, 10 < |\Delta n_{\text{CT}}| \leq 20; \\ \delta, 4 \leq |\Delta n_{\text{CT}}| \leq 10; \\ \varepsilon, 0 \leq |\Delta n_{\text{CT}}| \leq 4. \end{cases} \quad (7)$$

Коэффициенты усиления $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ и ε определены методом математического моделирования и заданы следующими значениями: $\alpha = 8, \beta = 0,7, \gamma = 0,1, \delta = 0,05, \varepsilon = 0,01$. Коэффициенты выбраны таким образом, чтобы переходная характеристика по частоте вращения СТ имела устойчивое вырожденное движение, без колебаний и перерегулирования.

Переходная характеристика по частоте вращения СТ при работе регулятора с переменным коэффициентом усиления представлена на рис. 5.

Регулятор с переменным коэффициентом усиления обеспечивает апериодический характер переходного процесса, более высокий запас устойчивости по сравнению с квадратичным регулятором (отсутствуют забросы и колебания) и статическую точность. Однако данный регулятор не обеспечивает требуемого быстродействия контура.

Рассмотрим следующий альтернативный регулятор, построенный на основе теории нечетких множеств.

Нечеткий логический регулятор пропорционального типа

НЛР относятся к классу экспертических систем и в качестве переменных используют обороты естественного языка "жарко", "холодно", "далеко", "близко" и т. д., в результате чего при синтезе НЛР отсутствует необходимость строгого математического описания объекта.

Благодаря этому свойству НЛР завоевали большую популярность у разработчиков электронных систем [1, 2]. Получаемый в результате синтеза нечеткий закон управления является нелинейным и хорошо работает в системах с высокой степенью сложности, нелинейностями типа зоны нечувствительности, гистерезиса, при отклонениях параметров неизменяемой части системы от их номинальных значений и потере информации при отказах [3–6].

Синтез НЛР пропорционального типа для контура поддержания частоты вращения силовой турбины реализован в соответствии с описанием [7–9]. Регулятор определен как статический с нелинейным коэффициентом усиления и описывается выражением вида

$$\dot{n}_{\text{TK_треб_}n_{\text{CT}}} = f(\Delta n_{\text{CT}}), \quad (8)$$

где $f(\Delta n_{\text{CT}})$ — нелинейная функция.

Для синтеза данного регулятора были использованы три терма для описания входной и выходной лингвистических переменных. Входной переменной является рассогласование между текущим и требуемым значением частоты вращения СТ Δn_{CT} , а выходной — требуемая производная частоты вращения ротора ТК $\dot{n}_{\text{TK_треб_}n_{\text{CT}}}$. Термы и диапазоны их изменения на четком множестве для входной и выходной лингвистических переменных представлены в табл. 1.

Таблица 1
Термы входной и выходной лингвистических переменных НЛР
II типа контура поддержания частоты
вращения силовой турбины

Лингвистическая переменная	Термы		
	<i>N</i>	<i>Z</i>	<i>P</i>
Входная	[−30, 0]	[−25, 25]	[0, 30]
Выходная	[−1.2, 0]	[−0.6, 0.6]	[0, 1.2]

В табл. 1 буквенные обозначения расшифровываются следующим образом:

N — (Negative) отрицательная величина;

Z — (Zero) нулевая величина;

P — (Positive) положительная величина.

Степень принадлежности каждого точного значения к одному из термов определяется с помощью функции принадлежности, вид которой может быть любым и определяется спецификой задачи. Для большинства задач используется несколько стандартных функций принадлежности, таких как треугольная, трапециевидная, гауссова, сигмоидная, *Z*-образная и *S*-образная. Но чаще всего разработ-

чики используют треугольную функцию принадлежности, описываемую выражением вида

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < A; \\ \frac{x-A}{B-A}, & A \leq x \leq B; \\ \frac{C-x}{C-B}, & B \leq x \leq C; \\ 0, & x > C, \end{cases} \quad (9)$$

(как, например, при решении похожей задачи в работе [10]).

В данной работе треугольная функция принадлежности используется для определения степени принадлежности четких значений к терму *Z*.

Степень принадлежности четких значений к термам *N* и *P* задается сигмоидной функцией принадлежности, описываемой выражением вида

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + \exp[-A(x - B)]}. \quad (10)$$

Здесь x — элемент четкого множества; *A*, *B* и *C* — подмножества нечеткого множества; $\mu_A(x)$ — степень принадлежности четких входных и выходных значений к каждому из термов нечеткого множества.

Совместное расположение функций принадлежности, определяющих степень принадлежности каждого точного значения к одному из термов входной и выходной лингвистических переменных, показано на рис. 6–7.

В диапазоне изменения Δn_{CT} свыше 30 % и меньше −30 % выходное значение требуемой про-

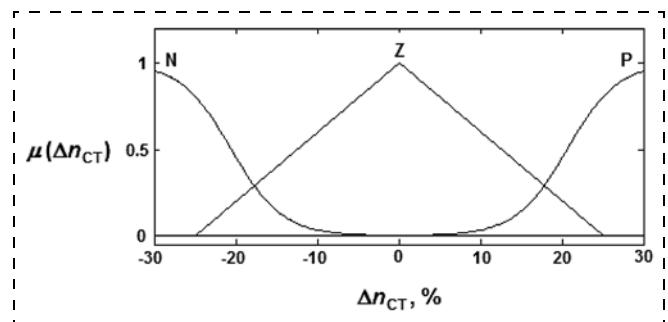


Рис. 6. Описание входных термов нечеткого регулятора пропорционального типа контура поддержания частоты вращения силовой турбины

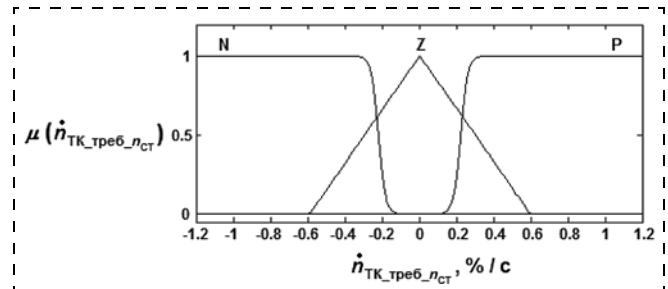


Рис. 7. Описание выходных термов нечеткого регулятора пропорционального типа контура поддержания частоты вращения силовой турбины

изводной частоты вращения ротора ТК принимается постоянным, равным $+10\%/\text{с}$ и $-10\%/\text{с}$ соответственно:

$$\dot{n}_{\text{TK_треб_}n_{\text{CT}}} = \begin{cases} 10\%/\text{с}, & \Delta n_{\text{CT}} > 30\% \\ -10\%/\text{с}, & \Delta n_{\text{CT}} < -30\% \end{cases} \quad (11)$$

На рис. 8 представлена переходная характеристика по частоте вращения силовой турбины двигателя ТВ7-117В при работе НЛР.

Из рис. 8 следует, что нечеткий П регулятор обеспечивает достаточный запас устойчивости, высокую статическую точность и апериодический переходный процесс, но не имеет требуемого быстродействия.

Повышения быстродействия можно добиться путем увеличения коэффициента усиления пропорциональной части регулятора. Однако это неизбежно приведет к возникновению заброса по регулируемой величине и колебательному переходному процессу.

Для повышения быстродействия исследуемой системы рассмотрим гибридную схему, объединяющую нечеткий и линейный регуляторы.

Нечеткий логический регулятор с пропорциональным коэффициентом усиления и корректирующим дифференциальным звеном

Регулятор данного типа включает: 1) нечеткий регулятор с пропорциональным коэффициентом усиления и 2) дифференциальное звено, вносящее поправку в вычисление значения $\dot{n}_{\text{TK_треб_}n_{\text{CT}}}$. Нечеткая пропорциональная часть синтезирована по аналогии с описанным выше НЛР и отличается только диапазоном изменения выходной переменной

$\dot{n}_{\text{TK_треб_}n_{\text{CT}}}$ (от $-8\%/\text{с}$ до $8\%/\text{с}$ — см. рис. 9).

Дифференциальное звено синтезировано по аналогии с дифференциальным звеном исходного ПД

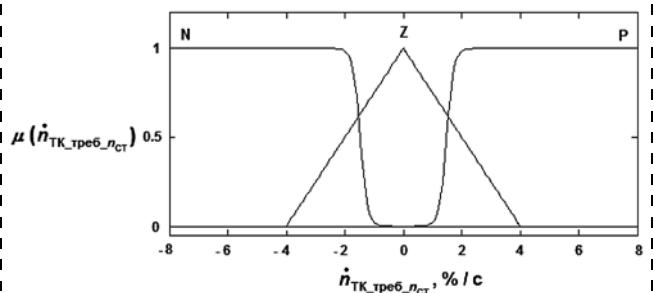


Рис. 9. Выходные термы, описывающие пропорциональный коэффициент усиления НЛР

регулятора, но отличается от него увеличенным выходным коэффициентом усиления. Кроме того, звено включается в работу, когда ошибка рассогласования Δn_{CT} находится в пределах $0,25\% \leq |\Delta n_{\text{CT}}| \leq 2,9\%$.

Выражение, описывающее дифференциальное звено, имеет вид

$$K_d = \begin{cases} C_{\text{стат}} K_{\text{стат}} dT_{\text{CT}}(n_{\text{TK}}) & \text{при } 0,25\% \leq |\Delta n_{\text{CT}}| \leq 2,9\% \\ 0 & \text{при } 0,25\% > |\Delta n_{\text{CT}}| > 2,9\% \end{cases} \quad (12)$$

График с переходной характеристикой по частоте вращения силовой турбины при работе НЛР с пропорциональным коэффициентом усиления и корректирующим дифференциальным звеном представлен на рис. 10.

Увеличенный коэффициент усиления, получаемый на выходе нечеткого регулятора, позволяет повысить быстродействие переходного процесса и увеличить статическую точность системы. Но при этом возникает заброс, который медленно убывает. Дифференциальное звено, встроенное в регулятор с отрицательным коэффициентом усиления, уменьшает значение заброса, тем самым сохраняя апериодический характер переходного процесса.

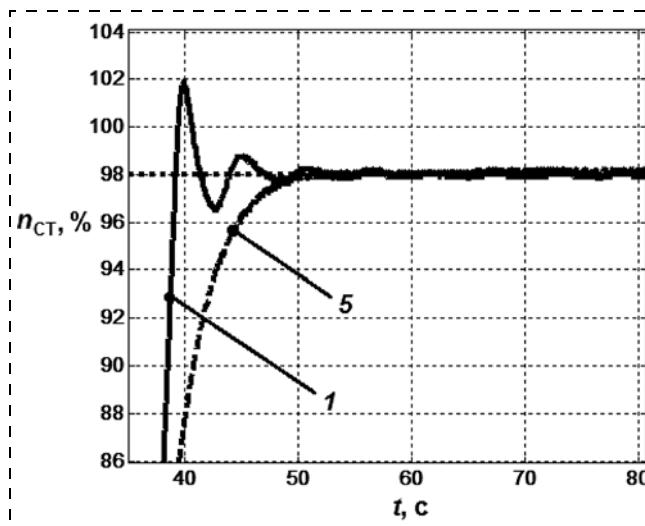


Рис. 8. Характеристика переходного процесса по частоте вращения силовой турбины при работе исходного ПД регулятора (1) и нечеткого регулятора пропорционального типа (5). Фрагмент

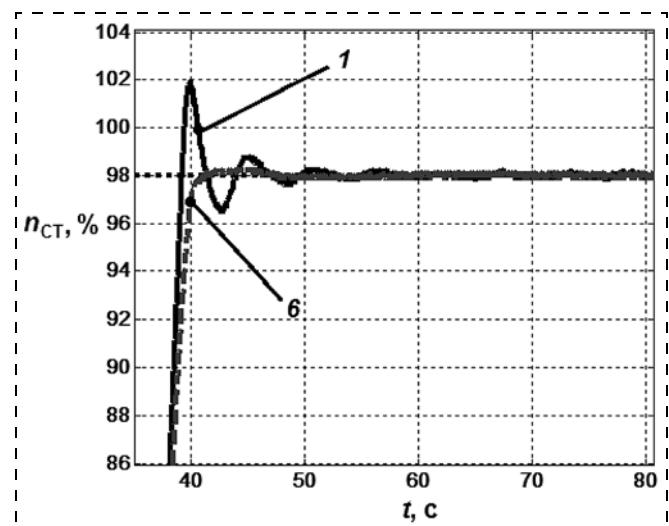


Рис. 10. Характеристика переходного процесса по частоте вращения силовой турбины при работе исходного ПД регулятора (1) и НЛР с пропорциональным коэффициентом усиления и корректирующим дифференциальным звеном (6). Фрагмент

Анализ качества работы контура поддержания частоты вращения силовой турбины с различными регуляторами

Тип регулятора	Статическая точность, %	Быстродействие, с	Характер переходного процесса	Значение заброса, %
Исходный ПД регулятор	$\pm 0,2$	20	Колебательный	1,9
ПД регулятор с уменьшенным коэффициентом K_p	$\pm 0,3$	15	Апериодический	—
Квадратичный регулятор	$\pm 0,2$	18	Колебательный	2,2
Регулятор с переменным коэффициентом K_p	$\pm 0,2$	16,5	Апериодический	0,1
НЛР пропорционального типа	$\pm 0,1$	16,5	Апериодический	—
НЛР пропорционального типа с корректирующим дифференциальным звеном	$\pm 0,2$	6	Апериодический	0,3

Сравнительный анализ качества работы различных регуляторов в контуре поддержания частоты вращения силовой турбины

Перейдем к сравнению качества управления переходной характеристикой по частоте вращения СТ и запасов устойчивости, обеспечиваемых каждым из рассмотренных выше регуляторов. На рис. 11 представлен график совместного расположения кривых переходного процесса по частоте вращения СТ при работе различных регуляторов.

На рис. 11 цифрами обозначены переходные процессы со следующими электронными регуляторами: 1 — исходный линейный ПД регулятор; 2 — ПД регулятор с уменьшенным пропорциональным коэффициентом усиления; 3 — квадратичный регулятор; 4 — регулятор с переменным коэффициентом усиления; 5 — НЛР с пропорциональным коэффициентом усиления; 6 — НЛР с пропорциональным коэффициентом усиления и корректирующим дифференциальным звеном.

В табл. 2 представлен численный анализ качества работы контура поддержания частоты вращения силовой турбины с различными регуляторами. Из рис. 11 и табл. 2 следует, что наилучшее качество переходного процесса по частоте вращения

силовой турбины обеспечивает нечеткий регулятор с пропорциональным коэффициентом усиления и корректирующим дифференциальным звеном. Переходная характеристика при работе данного регулятора отличается от прочих более высоким быстродействием (порядка 6 с) и отсутствием колебаний (кривая 6).

Остальные регуляторы уступают в отношении обеспечения требуемого качества управления. Например, переходная характеристика по частоте вращения СТ, полученная при работе квадратичного регулятора, по качеству почти не отличается от характеристики, полученной при работе исходного линейного ПД регулятора (кривые 1 и 3). Процесс характеризуется наличием колебаний и забросом порядка 4 %. Амплитуда колебаний составляет 0,2 %. Время переходного процесса — порядка 20 с. При анализе характеристик переходных процессов, полученных при работе ПД регулятора с уменьшенным пропорциональным коэффициентом усиления, регулятора с переменным коэффициентом усиления и НЛР П типа, видно, что эти характеристики незначительно отличаются друг от друга. Переходный процесс имеет апериодический характер (кривые 2, 4 и 5) и почти одинаковое быстродействие (у кривой 2 время переходного процесса составляет 15 с, у кривых 4, 5 — 16,5 с).

Заключение

Из проведенного анализа следует, что для обеспечения требуемого качества поддержания частоты вращения силовой турбины лучше всего подходит нелинейный или кусочно-линейный регулятор. В частности, это может быть регулятор с переменным коэффициентом усиления и дифференциальным звеном ограниченного диапазона работы. Данный диапазон может зависеть от значения ошибки согласования по частоте вращения силовой турбины.

Список литературы

- Гринев С. Нечеткая логика в системах управления // Компьютера. 2001. № 38. URL: <http://old.computerra.ru/offline/2001/415/13052>
- Энциклопедия АСУ ТП: Нечеткая логика, нейронные сети и генетические алгоритмы. URL: http://bookasutp.ru/Chapter5_6.aspx
- Чичерова Е. В. Исследование свойств робастности нечетких логических регуляторов на примере контура управления

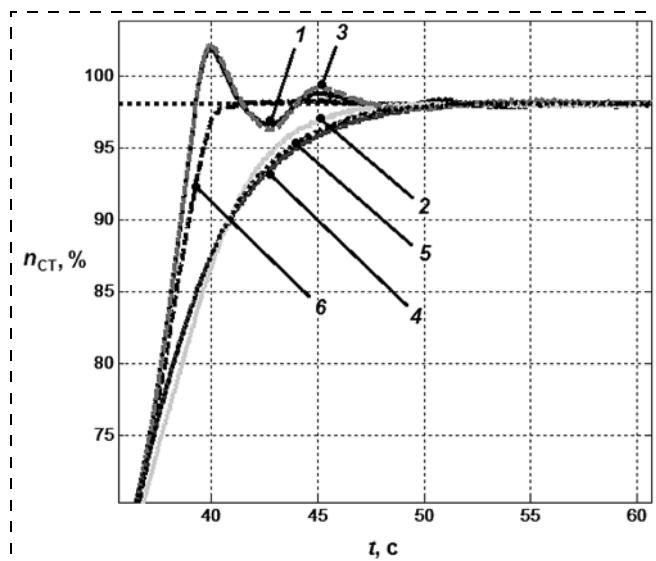


Рис. 11. Характеристики переходных процессов по частоте вращения силовой турбины при работе различных регуляторов

- расходом топлива газотурбинного двигателя. Ч. 1. // Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та. 2012. № 3 (34). С. 145–152.
4. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: учебник / Под ред. Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. 744 с.
 5. Бураков М. В., Коновалов А. С. Синтез нечетких логических регуляторов // Информационно-управляющие системы. 2011. № 1 (50). С. 22–27.
 6. Чичерова Е. В. Способы оптимизации динамических систем, содержащих нелинейности, типа зоны нечувствительности // Информационно-управляющие системы. 2012. № 6. С. 33–37.
 7. Бураков М. В. Нечеткие регуляторы: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2010. 236 с.
8. Арсеньев Г. Н., Шалыгин А. А. Математическое моделирование нечетких регуляторов на основе MATLAB // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2011. Т. 9, № 5. С. 26–37.
9. Mallesham G., Rajani A. Automatic tuning of PID controller using fuzzy logic // 8th International Conference on Development and Application System, Suceava (Romania). 2006. Р. 120–127.
10. Дудкин Ю. П., Титов Ю. К., Филиппенков Р. Г., Хижняков Ю. Н. Нечеткое управление частотой вращения свободной турбины газотурбинного двигателя // Вестник Московского авиационного института (государственный технический университет). 2010. Т. 17, № 6. С. 55–60.

Methods for Improvement of the Quality of the Power Turbine Speed Control of a Gas Turbine Engine

E. V. Chicherova, proffgrand@mail.ru, Klimov Co., St.-Petersburg, 194100, Russian Federation

Received on September 15, 2014

The article is dedicated to the task of improvement of the quality of the electronic system of automatic control of the gas turbine engines. An analysis was done of the control loop speed power turbines with various electronic controllers. The authors studied the linear PD controller, PD controller with reduced proportional coefficient, quadratic regulator, variable gain controller, fuzzy P controller and fuzzy P controller with a corrective differentiator. A study of the dynamic stability of the quality and quantity parameters of operation of each of the regulators is presented. When a control loop speed power turbine is operated with an original PD controller the required quality of the transients is not ensured. Achievement of the desired speed of the power turbine is accompanied by an overshoot of about 4 % and 0,2 % of the amplitude fluctuations. The transient time can be up to 20 seconds. Reduction of the proportional gain ensures an aperiodic transient increase of the stability margin (no overshoot) and enhances the static accuracy. But the performance is not efficient enough. The transient time is 15 seconds. A quadratic regulator improves the system performance, but does not ensure the required stability margin. The transient factor is accompanied by an overshoot of about 4 % of the amplitude fluctuations. A variable gain controller provides an aperiodic transient increase of the static accuracy and stability margin (no overshoot and amplitude fluctuations). However, the performance is not efficient enough. The transient time is 16.5 seconds. Fuzzy P controller ensures high static accuracy and speed, but the transition process is accompanied by a deregulation. In order to reduce the overshoot and ensure an aperiodic transition process in the fuzzy logic controller a differentiator is added with a negative gain. Because of the negative sign of the gain the differentiator compensates for the overshoot. For correct functioning of the controller the differentiator operates in a strictly defined range, and the error on the speed of the power turbine is within the range of $\pm[0,25 \%, 2,9\%]$. The resulting controller improves the system's performance up to 6 seconds, but it also ensures an aperiodic transient and high static accuracy of the system. Thereby the required quality control is achieved, when the speed of the power turbine is the best with a non-linear or piecewise-linear controller. For example, it can be PD-controller including a fuzzy P-gain and a differentiator with a limited interval of operation. Within this operating range it depends on the mismatch errors of the power turbine speed.

Keywords: gas turbine engine, power turbine, linear regulator, quadratic regulator, fuzzy logic controller, variable gain controller

For citation:

Chicherova E. V. Methods for Improvement of the Quality of the Power Turbine Speed Control of a Gas Turbine Engine, *Mekhanika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 6, pp. 402–408.

DOI: 10.17587/mau.16.402-408

References

1. Grinyaev S. *Nechetkaya logika v sistemakh upravleniya* (Fuzzy logic control systems), Komp'yutera, 2001, no. 38 (in Russian), available at: <http://old.computerra.ru/offline/2001/415/13052>
2. Entsiklopediya ASU TP: *Nechetkaya logika, neironnye seti i geneticheskie algoritmy* (Encyclopedia APCS: Fuzzy logic, neural networks and genetic algorithms) (in Russian), available at: http://bookasutp.ru/Chapter5_6.aspx
3. Chicherova E. V. *Issledovanie svoistv robastnosti nechetkikh logicheskikh reguljatorov na primere kontura upravleniya raskhodom topliva gazoturbinnogo dvigatelya. Ch. 1* (Robust research of the fuzzy logic controllers using a fuel flow control loop of the gas-turbine engine as an example), *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Aerokosmicheskogo Universiteta*, 2012, no 3 (34). Vol. 1. pp. 145–152 (in Russian).
4. Egupov N. D. ed. *Metody robastnogo, nejronechetkogo i adaptivnogo upravlenija: uchebnik* (Robust methods, neuro-fuzzy and adaptive control: a textbook), Moscow, Published in MGTU im. Baumana, 2002, iss. 2, 744 p. (in Russian).
5. Burakov M. V., Konovalov A. S. *Sintez nechetkikh logicheskikh reguljatorov* (Fuzzy Controllers Design), *Informatsionno-Upravlyayushchie Sistemy*, 2011, no 1 (50), pp. 22–27 (in Russian).
6. Chicherova E. V. *Sposoby optimizatsii dinamicheskikh sistem, soderzhashchikh nelineinosti, tipa zony nechuvstvitel'nosti* (Optimization Method for Dynamic Systems Containing Nonlinearity Type of the Dead Zone), *Informatsionno-Upravlyayushchie Sistemy*, 2012, no. 6 (61), pp. 33–37 (in Russian).
7. Burakov M. V. *Nechetkie reguljatory: uchebnoe posobie* (Fuzzy controllers: Tutorial), St. Petersburg, Published in GUAP, 2010, 236 p. (in Russian).
8. Arsen'ev G. N., Shal'ygin A. A. *Matematicheskoe modelirovanie nechetkikh reguljatorov na osnove MATLAB* (The synthesis of fuzzy controllers on the base MATLAB), *Informacionno-Izmeritel'nye i Upravljajushchie Sistemy* 2011, vol. 9, no 5. pp. 26–37 (in Russian).
9. Mallesham G., Rajani A. Automatic tuning of PID controller using fuzzy logic, *8th International Conference on Development and Application System*, Suceava, Romania, 2006, pp. 120–127.
10. Dudkin Ju. P., Titov Ju. K., Filippennkov R. G., Hizhnjakov Ju. N. *Nechetkoe upravlenie chastotoi vrashcheniya svobodnoi turbiny gazoturbinnogo dvigatelya* (Fuzzy control the speed of the free turbine gas turbine engines), *Vestnik Moskovskogo Aviacionnogo Instituta*, 2012, vol. 17, no 6, pp. 55–60 (in Russian).

Corresponding author:

E. V. Chicherova, Design engineer, Klimov Co., St. Petersburg, 194100, Russian Federation, e-mail: proffgrand@mail.ru

В. А. Лебедев, д-р техн. наук, valpaton@ukr.net, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины,
Ю. А. Ярос, канд. техн. наук, yaros.amity.mk.ua@gmail.com, НУК им. адмирала Макарова

Сравнительный анализ автоматических систем управления при автоматической сварке под флюсом

Обсуждаются возможность и целесообразность использования двух систем автоматического регулирования с комплексом обратных связей, организованных для решения задач стабилизации тока и напряжения сварочного процесса. Оценивается влияние инструментов на непрерывность и стабильность переноса электродного металла, а также возможность по управлению массопереносом. Показано, что обе исследованные системы автоматического регулирования обеспечивают стабильность сварочного процесса и необходимую точность и скорость отработки внешних возмущений, приводящих к изменению длины дуги.

Ключевые слова: сварка, наплавка, сварочная дуга, источник питания, подающий механизм, обратная связь, система автоматического регулирования, Украина

При автоматической сварке под флюсом обеспечиваются благоприятные условия как для стабильного (устойчивого) горения дуги, так и для технологической стабильности процесса в целом. Несмотря на это, изначально ведущие ученые проводили исследования, направленные на изучение влияния воздействия внешних возмущений на технологическую стабильность процесса, под которой понимается обеспечение постоянства геометрических размеров сварного шва или отклонение последних в допустимых пределах.

Разработка оптимальных систем управления, обеспечивающих отработку возмущений, а также непрерывность и стабильность переноса электродного металла, была и остается одной из важнейших задач при конструировании сварочного оборудования [1, 2]. Как показали многочисленные исследования, оборудование, построенное на принципе саморегулирования дуги, обеспечивает необходимую технологическую стабильность процесса в широком диапазоне режимов сварки [3].

Простота, надежность и низкая стоимость такого оборудования позволили широко использовать его в сварочном производстве различного назначения и в разных условиях. Применение более сложных и дорогостоящих систем управления, основанных на использовании сварочных головок с автоматически регулируемой по определенным зависимостям скоростью подачи и источников сварочного тока со сложными системами обратных связей, позволяет улучшить технологические результаты сварки и наплавки и расширяет диапазон режимов сварки, однако не всегда бывает экономически целесообразным и обоснованным.

Развитие и постоянное совершенствование сварочного оборудования по регулируемым электроприводам, в частности для механизмов подачи электродной проволоки [4], применение инверторных источников сварочного тока [5], тенденция к постоянному удешевлению систем управления и регулирования, их переход на качественно новый уровень по техническим характеристикам определили необходимость проведения комплекса новых

исследований, которые аналогичны проведенным ранее и отмечены в данной работе, но основываются на новых возможностях сварочной техники.

Цель настоящей работы — определить возможность и целесообразность использования систем автоматического регулирования с комплексом обратных связей, организованных для решения задач стабилизации тока и напряжения сварочного процесса, оценить влияние инструментов на непрерывность и стабильность переноса электродного металла (массоперенос), а также возможности по управлению массопереносом.

Необходимо заметить, что частично анализ влияния на сварочный процесс различных обратных связей по параметрам дугового процесса уже рассматривался [6], но не учитывал некоторые возможности нового поколения сварочного оборудования, например, в части их быстродействия.

Следует выделить два основных инструмента воздействия на сварочную дугу: источник сварочного тока и механизм подачи электродной проволоки. Ток и напряжение дугового процесса являются одновременно и средствами воздействия на дугу, и параметрами обратных связей для систем автоматического регулирования. При достаточно большом числе возможных вариантов обратных связей в работе рассмотрены граничные варианты, при которых каждый инструмент стабилизирует один параметр — ток или напряжение, — который и является для него обратной связью.

Был использован инверторный источник сварочного тока (ИИСТ) со следующими характеристиками, которые представлены на рис. 1:

1) ИИСТ имеет комбинированную внешнюю вольт-амперную характеристику (ВАХ) с крутопадающей рабочей частью, стабилизирующей сварочный ток, и жесткой характеристикой в области ниже 20 В с увеличенным посредством введения электронно перестраиваемых фильтров временем реагирования на сигнал возмущения. Система автоматического регулирования скорости подачи электродной проволоки с помощью положительной обратной связи по напряжению (при увеличении

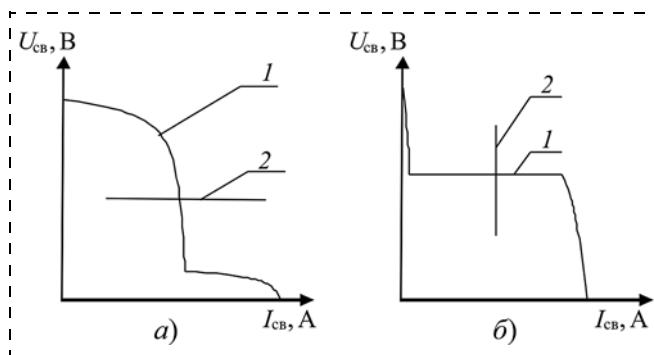


Рис. 1. Статические характеристики:

a — 1-я система автоматического регулирования, *б* — 2-я система автоматического регулирования: 1 — источника сварочного тока, 2 — системы автоматического регулирования скорости подачи

напряжения увеличивается скорость подачи электродной проволоки и наоборот) стабилизирует напряжение сварки U_{cb} (рис. 1, *a*). Будем называть эту систему "*1-я система автоматического регулирования*";

2) ИИСТ имеет жесткую ВАХ, стабилизирующую напряжение и имеющую ограничение кратности тока короткого замыкания. Система автоматического регулирования скорости подачи электродной проволоки с помощью отрицательной обратной связи по току (при увеличении тока уменьшается скорость подачи электродной проволоки и наоборот) стабилизирует I_{cb} (рис. 1, *б*). Назовем эту систему "*2-я система автоматического регулирования*".

Для оценки эффективности отработки системами внешних возмущений (возмущений по вылету электродной проволоки) были проведены общепринятые эксперименты [2] по наплавке валиков на пластины стали 10ХСНД поперек фрезерованных пазов со скосом спуска и подъема 45° , глубиной 10 мм и прямоугольных пазов глубиной 5 мм и 10 мм. Наплавку проводили проволокой Св 08Г2С диаметром 2 мм, под слоем флюса ОСЦ 45 на режимах 250A, 30V и 400A, 32V (250 A является минимально допустимым током для ИП с жесткой характеристикой [1]). Вылет электрода оставался неизменным, равным 25 мм. Режимы сварки и диаметр электродной проволоки были выбраны из соображений создания наиболее жестких условий для систем автоматического регулирования, так как исследования [3] доказывают, что как раз при сварке электродной проволокой малого диаметра необходимо точное сохранение вылета электрода, а кроме того, проволоки малого диаметра имеют наименьшее допустимое время восстановления процесса.

Проведенные исследования и анализ осцилограмм показали:

1) переход через паз со скосом спуска и подъема 45° , глубиной 10 мм на обоих режимах с применением двух систем автоматики происходит стablyно, без резких изменений тока и напряжения. Обеспе-

чивается технологическая стабильность процесса (рис. 2, *а*);

2) переход через прямоугольный паз глубиной 5 мм на обоих режимах с применением обеих систем автоматического регулирования происходит стablyно, без резких изменений тока и напряжения. Обеспечивается технологическая стабильность процесса (рис. 2, *б*);

3) переход через прямоугольный паз глубиной 10 мм на режиме 250 A с применением обеих систем автоматического регулирования происходит с характерными резкими скачками тока и напряжения при резком увеличении вылета (длины дуги) (на входе в паз) и укорочении длины дуги и, соответственно, вылета (на выходе из паза) (рис. 3, *а*). Прерывание горения дуги отсутствует, время полной стабилизации тока и напряжения в обоих случаях практически одинаково и не превышает на входе и выходе из паза 0,5 с и 0,2 с соответственно. Увеличенное время стабилизации при входе объясняется увеличенной зоной возмущения за счет стекания жидкого металла в паз. На входе и выходе из паза наблюдается недопустимое уменьшение ширины шва, а при применении 2-й системы автоматического регулирования — даже прерывание шва, вызванное резким смещением точки горения дуги со дна паза на его кромку при выходе (рис. 2, *в*). Технологическая стабильность процесса не обеспечивается;

4) переход через прямоугольный паз глубиной 10 мм на режиме 400 A с применением обеих систем автоматики происходит без резких изменений тока и напряжения, однако, судя по осцилограммам, наблюдается увеличение амплитуд колебаний тока и напряжения при входе и выходе из паза на 5...7 % (рис. 3, *б*) и длительностью до 0,5 с. При этом обеспечивается технологическая стабильность процесса.

Полученные результаты позволяют утверждать, что обе системы автоматического регулирования стablyно отрабатывают плавные изменения длины дуги (скос спуска и подъема 45°) с большой ам-

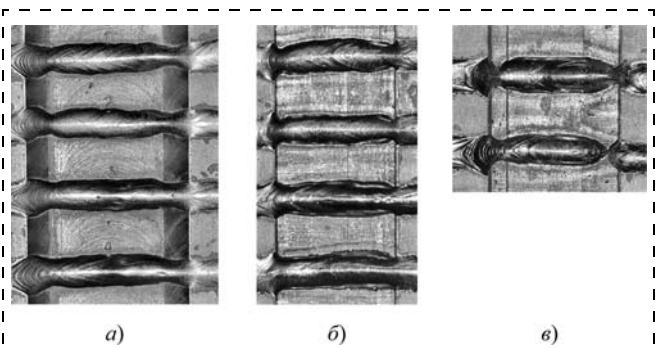


Рис. 2. Внешний вид наплавленных валиков:

а — через паз со скосом спуска и подъема 45° , глубиной 10 мм; *б* — через прямоугольный паз глубиной 5 мм; *в* — дефекты при наплавке через прямоугольный паз глубиной 10 мм, $I_{cb} = 250$ A, $U_{cb} = 30$ В

плитудой (10 мм) и резкие изменения (прямоугольный паз) со средней амплитудой (5 мм) возмущений во всем диапазоне режимов сварки, обеспечивая технологическую стабильность процесса. Обе системы автоматического регулирования стабильно отрабатывают резкие изменения длины дуги и с большой (10 мм) амплитудой возмущений, однако технологическая стабильность процесса обеспечивается только на форсированных (400 А) режимах сварки.

Известно [2], что время восстановления заданного режима сварки при сварке с постоянной скоростью подачи электродной проволоки обратно пропорционально углу наклона ВАХ [2, 3]. При жесткой ВАХ время восстановления минимально, а при крутопадающей ВАХ — максимально.

Необходимо отметить, что в соответствии с результатами исследований применение системы автоматического регулирования с крутопадающей рабочей частью и автоматическим регулированием скорости подачи электродной проволоки с положительной обратной связью по напряжению не увеличивает время восстановления заданного режима сварки даже в сравнении с системой, имеющей жесткую ВАХ и автоматическое регулирование скорости подачи электродной проволоки с отрицательной обратной связью по току.

На основании проведенных исследований можно утверждать, что обе системы управления стабильно и достаточно четко отрабатывают внешние возмущения, вызывающие изменение длины дуги, и могут применяться при производстве оборудования для автоматической сварки под флюсом.

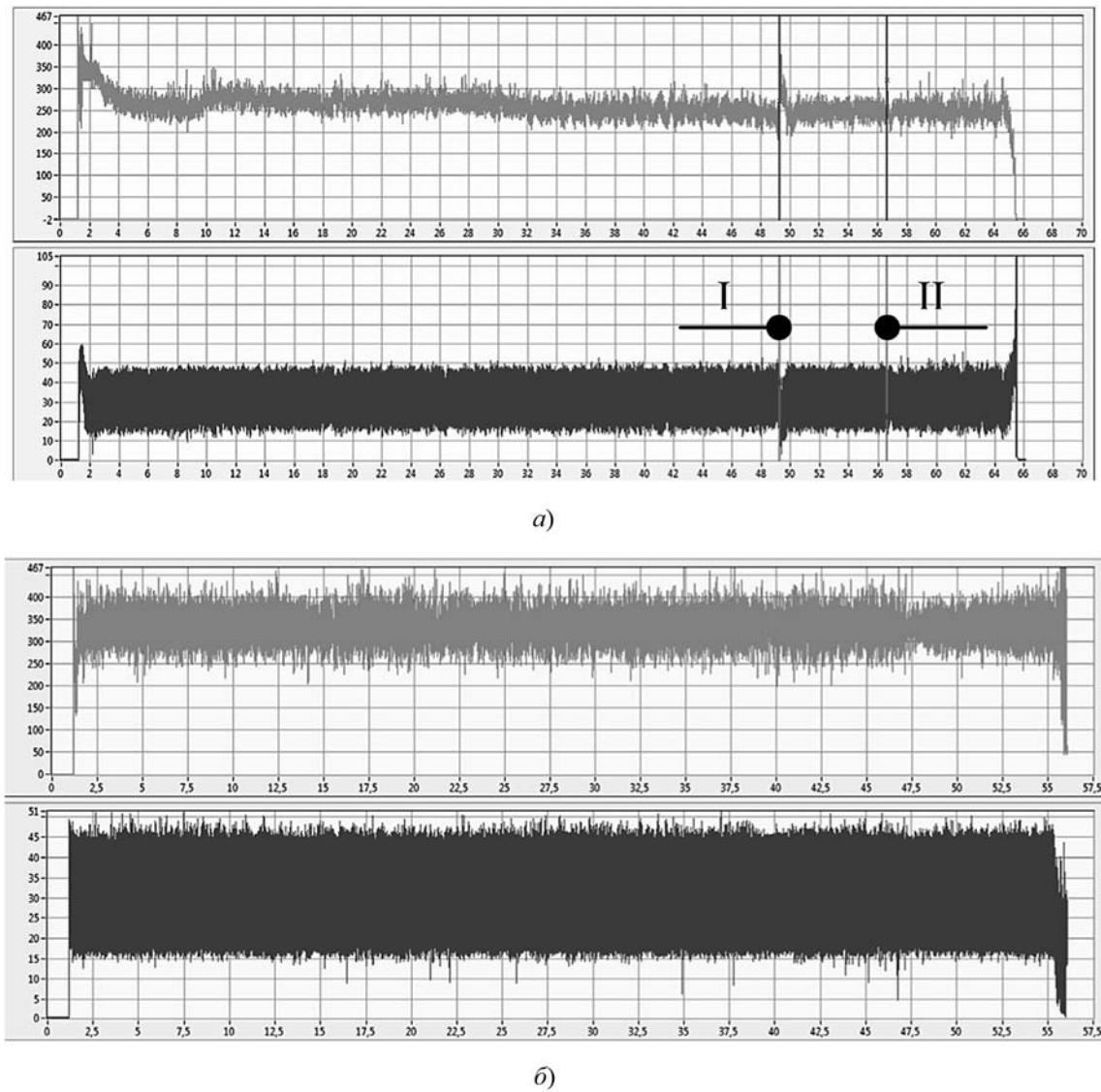


Рис. 3. Осциллограммы тока I_{CB} и напряжения U_{CB} :

a — 1-я система автоматики, $I_{\text{CB}} = 250 \text{ А}$, $U_{\text{CB}} = 30 \text{ В}$, вход (I) и выход (II) из прямоугольного паза глубиной 10 мм на 49 с и 57 с соответственно; *b* — 2-я система автоматики, $I_{\text{CB}} = 400 \text{ А}$, $U_{\text{CB}} = 32 \text{ В}$

Результаты математической обработки осциллографов

Параметры	1-я система автоматического регулирования				2-я система автоматического регулирования			
	250A, 30B		400A, 32B		250A, 30B		400A, 32B	
	I_{cb}	U_{cb}	I_{cb}	U_{cb}	I_{cb}	U_{cb}	I_{cb}	U_{cb}
Среднее значение	249	29	392	32	243	30	405	32
Коэффициент вариации	0,022	0,079	0,017	0,061	0,195	0,063	0,056	0,049

Для исследования особенностей процесса при применении разных систем автоматического регулирования была проведена наплавка валика на ровную пластину на приведенных ранее режимах. Исследование осциллографов процесса сварки-наплавки проводили с помощью информационно-

измерительной системы IMS v3.1, имеющей возможность статистической обработки данных, результаты которых приведены в таблице и на рис. 3, 4.

Результаты статистической обработки осциллографов позволяют отметить следующее:

1) источник сварочного тока стабилизирует параметр I_{cb} лучше, чем механизм подачи электродной проволоки. Стабилизация U_{cb} не может быть выделена в этом отношении. Так, коэффициенты вариации для стабилизации тока — 0,017...0,022 и 0,056...0,195, для стабилизации напряжения, соответственно 0,061...0,079 и 0,049...0,063;

2) стабилизация параметров улучшается с увеличением силы тока. Низкая стабилизация I_{cb} при использовании 2-й системы автоматического регулирования на режиме 250 А (коэффициент вариации 0,195) объясняется предельностью режима для жесткой ВАХ источника сварочного тока [1].

Для анализа динамических характеристик системы экспериментальным путем были определены:

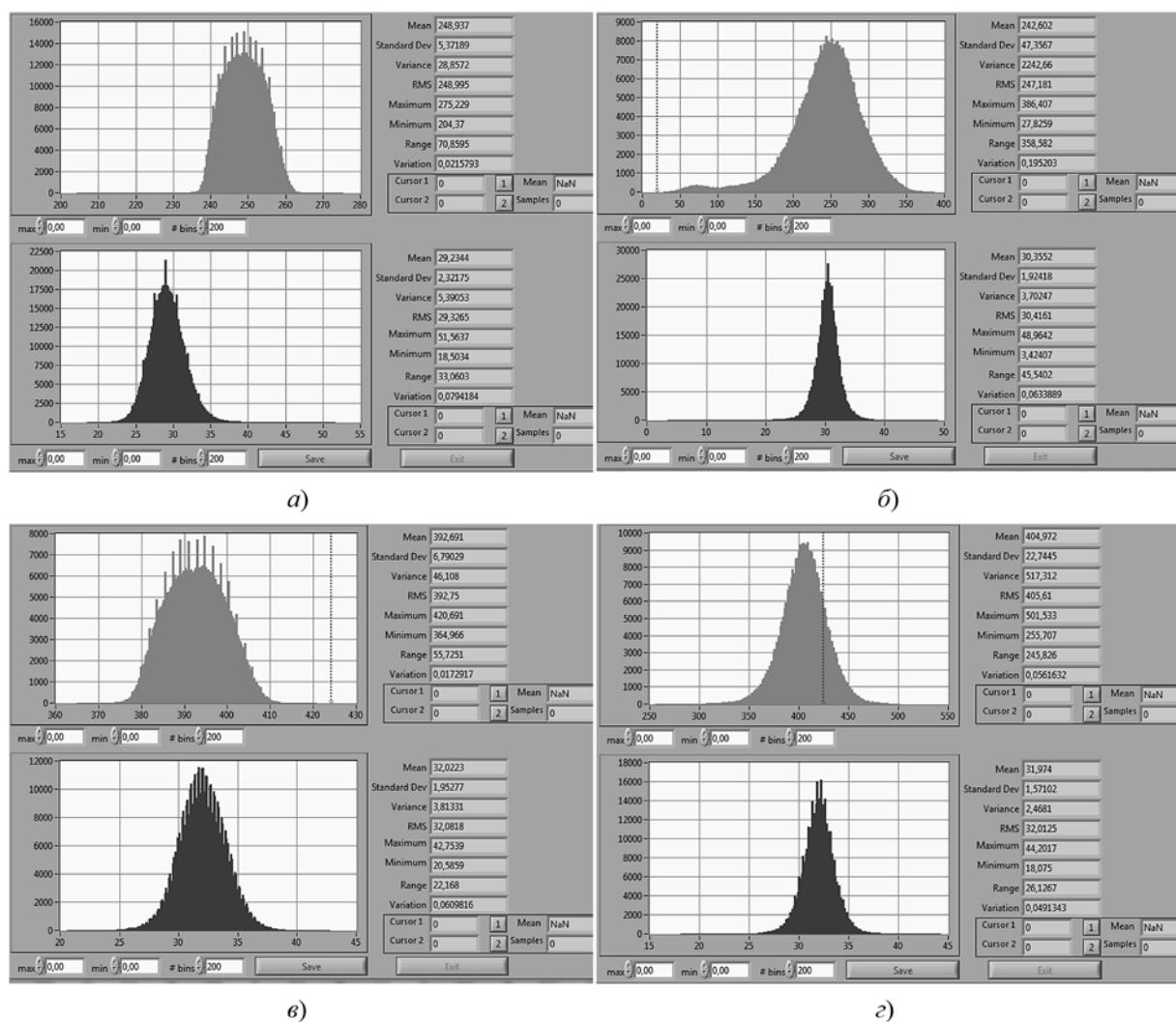


Рис. 4. Гистограммы осциллографов тока и напряжения:

а, в — 1-я система автоматического регулирования; б, г — 2-я система автоматического регулирования; а, б — $I_{cb} = 250$ А, $U_{cb} = 30$ В; в, г — $I_{cb} = 400$ А, $U_{cb} = 32$ В

электромеханическая постоянная комплектного механизма подачи электродной проволоки с коллекторным электродвигателем и обмоткой возбуждения $T_{\text{ЭМ}} \approx 30$ мс и электрическая постоянная цепи источника сварочного тока $T_{\text{ИП}} \approx 1$ мс.

Полное время стабилизации процесса подачи двигателем подачи электродной проволоки $T_{\text{ЭМ}} \approx 90$ мс, а полное время стабилизации процесса источником сварочного токапитания $T_{\text{ИП}} \approx 3$ мс. Принимая в соответствии с работой [3] время восстановления заданного режима сварки при саморегулировании, которое однозначно обеспечивает устойчивость процесса, равным $T_c \approx 100$ мс, получим следующее соотношение:

$$T_c > T_{\text{ЭМ}} \gg T_{\text{ИП}}. \quad (1)$$

Неравенство (1) показывает, что динамических свойств комплектного механизма подачи электродной проволоки и источника сварочного тока вполне достаточно для обеспечения устойчивого процесса сварки под флюсом, при этом динамические свойства источника сварочного тока гораздо выше, чем механизма подачи. Динамических характеристик ИИСТ достаточно для влияния на электрические параметры сварочного процесса ($U_{\text{св}}, I_{\text{св}}$), и эти параметры должны стабилизоваться: при использовании 1-й системы автоматического регулирования — $I_{\text{св}}$, при использовании 2-й системы автоматического регулирования — $U_{\text{св}}$. Однако следует отметить, что, несмотря на огромную разницу динамических характеристик комплектного механизма подачи и источника сварочного тока, различия в стабилизации напряжения между подающим механизмом (1-я система автоматического регулирования) и источником сварочного тока (2-я система автоматического регулирования) небольшие. Об этом свидетельствуют коэффициенты вариации 0,061...0,079 и 0,049...0,063 соответственно (см. таблицу).

Для объяснения этого факта представим сварочную цепь как последовательную цепь постоянного тока, для которой справедливо уравнение

$$E_{\text{ИП}} - U_d = I(R_{\text{ИП}} + R_{\text{сц}}), \quad (2)$$

где $E_{\text{ИП}}$ — ЭДС источника питания; U_d — напряжение на дуге; $R_{\text{ИП}}$ — внутреннее сопротивление источника сварочного тока; $R_{\text{сц}}$ — сопротивление сварочных кабелей; I — обобщенное обозначение силы тока.

На основании (2) очевидно, что изменение силы тока I , а также внутреннего сопротивления источника сварочного тока $R_{\text{ИП}}$ компенсирует изменение напряжения на дуге U_d при $E_{\text{ИП}} = \text{const}$ (2-я система автоматического регулирования).

Так как значение силы тока I постоянно во всей сварочной цепи, то стабилизация тока источником сварочного тока (1-я система автоматического регулирования), согласно (4), стабилизирует и силу тока дуги I_d .

Отсутствие различий в колебаниях напряжения при использовании разных систем автоматического регулирования позволяет заключить, что мгновенное напряжение на дуге мало зависит от ВАХ. Очевидно, что мгновенное напряжение на дуге определяется длиной дуги в данный момент времени, которая изменяется циклически, от начала формирования капли до максимального размера капли, непосредственно перед отрывом и после слияния капли с ванной.

Выводы

1. Обе исследованные системы автоматического регулирования обеспечивают стабильность сварочного процесса и необходимую точность и скорость отработки внешних возмущений, приводящих к изменению длины дуги.

2. Учитывая, что времена восстановления заданного вылета при саморегулировании и при использовании системы автоматического регулирования с отрицательной обратной связью по току сварки достаточно близки к равенству, а источник сварочного тока практически не улучшает стабилизацию напряжения, применение системы автоматического регулирования с отрицательной обратной связью по току нецелесообразно в сравнении с более простой и дешевой системой саморегулирования.

3. Система автоматического регулирования с обратной связью по напряжению лучше стабилизирует ток, кроме того, применяемая в этом случае ВАХ источника расширяет диапазон технологических возможностей в сторону снижения минимально допустимого тока, поэтому может быть рекомендована для сварки тонколистового металла или наплавки.

4. Свойства динамических характеристик ИИСТ достаточны для стабилизации тока в процессе переноса электродного металла. Это позволяет предположить возможность влияния на процесс переноса электродного металла не только путем наложения импульсов тока, но и другими способами модуляции.

Список литературы

- Патон Б. Е., Лебедев В. К. Сборник трудов по автоматической сварке под флюсом. Киев: Изд-во АН УССР, 1948. С. 260—277.
- Заруба И. И. Минимальное напряжение холостого хода генераторов постоянного тока для автоматической сварки под флюсом // Автоматическая сварка. 1950. № 3. С. 34—39.
- Патон Б. Е. Саморегулирование дуги при сварке плавящимся электродом // Автоматическая сварка. 1952. № 1. С. 38—45.
- Лебедев В. А. Электроприводы в современном механизированном и автоматизированном оборудовании для дуговой сварки // Электротехнические и компьютерные системы. 2013. № 11 (87). С. 7—16.
- Владимиров А. В., Хабузов В. А., Лебедев В. А., Максимов С. Ю., Галышев А. А. Универсальный источник питания для дуговой сварки и плазменной резки // Автоматическая сварка. 2011. № 1. С. 41—46.
- Лебедев В. А., Пичак В. Г. Полуавтоматы для сварки и наплавки типа ПШ 107 // Автоматическая сварка. 1998. № 7. С. 38—42.

Comparative Analysis of the Automatic Control Systems during Automatic Submerged Arc Welding

V. A. Lebedev, valpaton@ukr.net,
E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 03650, Ukraine,
Yu. A. Jaros, jaros.amity.mk.uk@gmail.com,
Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolayev, 54025, Ukraine

Received on January 29, 2015

The paper analyzes the feasibility and advisability of the use of the multiple automatic control systems with a feedback complex, intended to meet the challenges of the current and voltage stabilization of the welding process, and assess the impact of tools on the continuity and stability of the electrode metal transfer, as well as a possibility of the mass transfer control.

The authors investigated the cruise control wire feed with a positive feedback voltage of the welding process and negative current feedback arc characteristics for different types of the welding power source. In order to evaluate the effectiveness of development of a system of external disturbances, experiments were conducted on the conventional surfacing rolls on 10HSND plate steel with grooves milled across. The authors used a welding current source inverter of a modern type. Analysis of the results was carried out on the basis of the statistical processing of the current and voltage waveforms of the arc in a number of experiments. It was shown that both the investigated and the automatic control systems ensure stability of the welding process and the required accuracy and speed of running of the external disturbances, leading to changes in the arc length. The dynamic characteristics of the welding power source inverter are sufficient to stabilize the current in the electrode metal transfer. The automatic control system with a negative feedback welding current does not have an impact on the welding process and the system of self-regulation of the arc, and therefore its use in some cases is inappropriate. Understanding, that stabilization is one of the possible boundary impacts, suggests a possibility of influencing the process of the electrode metal transfer not only by imposition of the current pulses, but also by its more complex modulation.

Keywords: welding, overlaying welding, arc welding, SP, feeder, feedback, automatic control system, Ukraine

For citation:

Lebedev V. A., Jaros Y. A. Comparative Analysis of the Automatic Control Systems during Automatic Submerged Arc Welding, *Mekhanika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 5, pp. 409–414.

DOI 10.17587/mau.16.409-414

Reference

1. Paton B. E., Lebedev V. K. *Sbornik trudov po avtomaticheskoi svarke pod flyusom* (Collection of works by automatic submerged arc welding), Kiev, Publishing House of Academy of Science of USSR, 1948. P. 260–277 (in Russian).

2. Zaruba I. I. *Minimal'noe napryazhenie kholostogo khoda generatorov postoyannogo toka dlya avtomaticheskoi svarki pod flyusom* (Minimum load voltage DC generators for automatic submerged arc welding), *Avtomaticheskaya Svarka*, 1950, no. 3, pp. 34–39 (in Russian).

3. Paton B. E. *Samoregulirovaniye dugi pri svarke plavyashchimysya elektrodom* (Self-regulation of arc welding consumable electrode), *Avtomaticheskaya Svarka*, 1952, no. 1, pp. 38–45 (in Russian).

4. Lebedev V. A. *Elektroprivody v sovremennom mekhanizirovannom i avtomatizirovannom oborudovanii dlya dugovoi svarki* (The actuators in modern mechanized and automated equipment for arc welding), *Elektrotehnicheskie i Komp'yuternye Sistemy*, 2013, no. 11 (87), pp. 7–16 (in Russian).

5. Vladimirov A. V., Khabuzov V. A., Lebedev V. A., Maksimov S. Yu., Galyshov A. A. *Universal'nyi istochnik pitaniya dlya dugovoi svarki i plazmennoi rezki* (Universal power supply for arc welding and plasma cutting), *Avtomaticheskaya Svarka*, 2011, no. 1, pp. 41–46 (in Russian).

6. Lebedev V. A., Pichak V. G. *Poluavtomaty dlya svarki i naplavki tipa PSh 107* (Semi-automatic welding and welding-type PSH 107), *Avtomaticheskaya Svarka*, 1998, no. 7, pp. 38–42 (in Russian).

Corresponding author:

Lebedev Vladimir A., D. Sc., Chief Designer, E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy Of Sciences Of Ukraine, Kiev, 03650, Ukraine, e-mail: valpaton@ukr.net

ИНФОРМАЦИЯ

3—9 сентября 2015 г.

на Черноморском побережье в пос. Дивноморское (Краснодарский край, Геленджикский район)

состоится

Международный конгресс по интеллектуальным системам и информационным технологиям

ТЕМАТИКА КОНГРЕССА:

- Биоинформатика
- Интеллектуальные САПР, CASE-, CALS-технологии
- Искусственный интеллект и мягкие вычисления
- Представление и извлечение знаний
- Многоагентные системы и принятие решений
- Перспективные информационные технологии
- Проблемы образования
- Синергетика и моделирование сложных систем
- Эволюционное моделирование и генетические алгоритмы
- Экспертные системы
- Информационная безопасность
- SAP-технологии
- Инструментальные, математические и информационные средства экономики

Подробную информацию о конгрессе см. на сайте:

<http://icai.tti.sfedu.ru/>

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 004.93

В. В. Инсаров¹, д-р техн. наук, зам. нач. подразделения, wiliam@gosniias.ru,
С. В. Тихонова¹, вед. инженер, svetico@yandex.ru, **А. В. Ранкова²**, студент, anastasy.rankova@gmail.com,

Д. А. Фортинский², студент, mitia.fortinsky@yandex.ru,

¹ Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, Москва,

² Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва

Использование градиентного подхода в задаче выделения контуров крупных техногенных объектов на изображениях многообъектных наземных сцен¹

Рассматривается процедура применения набора контурных операторов к исходным полутоновым изображениям наземных сцен на этапе предобработки при решении задачи поиска и определения местоположения объекта на изображении многообъектной наземной сцены методом сопоставления текущего и эталонного изображений. Предложен алгоритм, позволяющий в значительной мере сократить число контуров, соответствующих присутствующим на текущем изображении мелким объектам и текстурам.

Ключевые слова: обработка изображений, выделение контуров, селекция объектов, наземная сцена, алгоритмы обработки, эталонное изображение, текущее изображение

Введение

Известно, что эффективность процессов управления, особенно при управлении робототехническими подвижными объектами, во многом зависит от полноты используемой информации о состоянии внешней среды. Возможности наблюдения и оценивания состояния внешней среды, оценки достижимости целей управления и оперативного планирования маршрута движения робототехнического объекта тесно связаны с решением задач обнаружения и распознавания (селекции) объектов наземной сцены, реконструкции трехмерных изображений и анализа наблюдаемой сцены, оценки траектории собственного движения и принятия решений. Реализация этих задач во многих случаях базируется на использовании современной технологии "машинного зрения". Например, при реализации задач навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов парадигма решения может формулироваться следующим образом [1–3]: на основе априорной информации о рассматриваемой сцене (участке Земной поверхности) и апостериорной информации о той же сцене, полученной в процессе полета, сопоставляются текущее и эталонное изображения с последующей локализацией на текущем изображении заданных объектов сцены и определением значений текущих координат этих объ-

ектов в целях формирования сигналов управления движением летательного аппарата.

К априорной информации о рассматриваемой сцене, позволяющей построить ее эталонное изображение (ЭИ), можно отнести: тип и число объектов сцены, их взаимное расположение, геометрические и яркостные характеристики, характеристики двумерных полей (поля рельефа, оптического контраста и т. п.).

К апостериорной информации о рассматриваемой сцене, получаемой в процессе полета, можно отнести информацию о текущих условиях наблюдения сцены, о характеристиках датчиков и их ошибках и т. п. Апостериорная информация определяет вид текущего изображения (ТИ), получаемого на выходе бортового датчика в том или ином спектральном диапазоне.

В общем случае при решении задачи поиска и определения местоположения объекта на изображении многообъектной наземной сцены возможны два принципиально отличных подхода.

Первый подход использует только информацию о самом объекте в виде набора его рабочих признаков.

Второй подход в дополнение к информации о самом объекте использует сведения о взаимном расположении некоторых других стационарных объектов на рассматриваемой сцене. В этом случае, при известном расположении искомого объекта относительно других объектов сцены, задачу можно свести к задаче определения относительных координат

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 14-08-00621а.

объекта на сцене. Эти координаты могут быть определены, даже если сам объект частично (и даже полностью) не видим. Для решения этой задачи наряду с эталонами отдельных объектов формируется эталон всей сцены, на котором отмечается местоположение искомого объекта, и выполняется последующий поиск положения эталона на ТИ сцены — "привязка" эталона к ТИ. После "привязки" можно считать, что положение искомого объекта на ТИ определено.

Очевидно, что рассматриваемое в качестве исходной информации полутонаовое изображение наземной сцены содержит достаточное количество малоинформационных сведений, которые занимают, однако, большие объемы памяти и требуют выполнения большого числа вычислительных операций при попытке использования их для селекции заданного объекта сцены. В теории распознавания образов существуют и широко применяются методы сокращения избыточности информации о сцене, связанные с ее представлением в виде отдельных однородных областей (сегментацией) и выделением контурных линий.

Контурные, или граничные, линии разделяют на изображении участки с различными свойствами, поэтому выделение контуров иногда рассматривается как предварительная обработка, направленная на последующее выполнение сегментации. В ходе такой предварительной обработки выполняются две основные задачи: приведение полученной исходной информации к виду, необходимому для решения конечной задачи; максимально возможное сокращение "ненужной" информации при сохранении "нужной" информации неизменной или ее улучшении. Избыток "ненужной" информации ("вредной" или "бесполезной") влияет, в первую очередь, на время, затрачиваемое на решение задачи в целом; в ряде случаев он может повлиять и на точность полученных результатов.

Известно, что при всем многообразии возможных признаков, используемых для распознавания стационарных объектов наземных сцен, в условиях широкого диапазона погодной и временной изменчивости их характеристик наибольшей robustностью обладают геометрические признаки ("геометрический контент"). В свою очередь, наиболее стабильными признаками текущего изображения, несущими информацию о геометрии объектов наблюдаемой сцены, являются контурные препараты изображения объектов сцены и направления перепадов интенсивности яркостных характеристик, т. е. направления градиентов яркостей на текущем изображении. В каждом пикселе, соответствующем границе изображения некоторого объекта, направление градиента яркостной характеристики будет близко к перпендикуляру к направлению ориентации ребра данного объекта.

Все сказанное послужило стимулом для разработки и совершенствования различных методов и алгоритмов предварительной обработки изображе-

ний, базирующихся на выделении контуров на полутонаовых изображениях сцен различного типа, которым в современной теории цифровой обработки изображений уделяется большое внимание. Традиционное решение задачи выделения контуров включает в себя четыре этапа: подчеркивание (усиление) яркостных перепадов, выделение граничных точек, уточнение (скелетизация) и устранение разрывов. Естественно, эффективное решение указанной задачи на каждом из этапов определяется особенностями рассматриваемой сцены, яркостными и геометрическими характеристиками объектов сцены, принятymi допущениями и возможностью практической реализации при заданных ограничениях.

В данной статье рассматривается одна из возможных модификаций градиентного метода выделения контуров применительно к решению задачи выделения контуров на изображениях многообъектных наземных сцен, полученных бортовыми датчиками при настильных углах визирования.

Постановка задачи

Учитывая все сказанное выше, остановимся, прежде всего, на специфических особенностях рассматриваемого класса сцен и условий их визирования.

Эти особенности заключаются в следующем:

- зависимость качества получаемой исходной информации (текущего изображения в целом) от погодных условий в результате влияния атмосферы;
- наличие на текущем изображении шумовых составляющих естественного и искусственного происхождения (шумовые составляющие маскирующего и заградительного типа, аппаратурные помехи в фотоприемном устройстве бортового датчика и т. п.);
- зависимость качества информации об отдельно взятом объекте от расстояния "точка наблюдения — объект" (результат влияния атмосферы); на одном и том же изображении контуры объектов, находящихся на разном удалении от точки наблюдения, оказываются в разной степени размытыми;
- наличие на сцене протяженных объектов (здания промышленно-городской застройки, мосты, водные и лесные массивы, облака и т. п.), контурные препараты которых относятся к классу протяженных контуров;
- возможное присутствие на сцене множества мелких объектов и структур.

Исходя из особенностей рассматриваемого класса сцен и условий их визирования, а также из принятой парадигмы селекции объектов, под контуром будем понимать набор точек изображения, в которых амплитуда яркостного градиента превышает заранее заданный порог. Такое определение контура отличается от определения, используемого в ряде других задач (например, в задачах распозна-

вания текста). Отличие заключается в том, что на контур не накладываются такие ограничения, как замкнутость и однопиксельная толщина.

Для указанных выше условий рассматривается проблема построения эффективной и достаточно простой для практической реализации процедуры выделения контуров протяженных объектов, используемой на этапе предварительной обработки изображений в задаче селекции заданного объекта.

Описание предложенного метода

Все алгоритмы выделения контуров на полутоновом изображении в той или иной мере используют информацию об амплитуде градиента в каждой точке изображения. Для этого в большинстве алгоритмов используется свертка текущего изображения с двумя ортогональными масками. Амплитуда градиента в точке в простейшем случае вычисляется как сумма двух откликов, полученных в данной точке (типичный пример — оператор Собеля).

Ряд алгоритмов использует в качестве дополнительной информации информацию о направлении градиента. При этом в качестве исходных данных для вычисления направления градиента берутся отклики, полученные с использованием двух ортогональных масок.

M_1	M_2
-1 0 +1	+1 +2 +1
-2 0 +2	0 0 0
-1 0 +1	-1 -2 -1

Рис. 1. Маски, используемые для оператора Собеля

	Прюитт	Кирш	Робинсон (1)	Робинсон (2)
Восток	1 1 -1	5 -3 -3	1 0 -1	1 0 -1
	1 -2 -1	5 0 -3	1 0 -1	2 0 -2
	1 1 -1	5 -3 -3	1 0 -1	1 0 -1
Северо-Восток	1 -1 -1	-3 -3 -3	0 -1 -1	0 -1 -2
	1 -2 -1	5 0 -3	1 0 -1	1 0 -1
	1 1 1	5 5 -3	1 1 0	2 1 0
Север	-1 -1 -1	-3 -3 -3	-1 -1 -1	-1 -2 -1
	1 -2 1	-3 0 -3	0 0 0	0 0 0
	1 1 1	5 5 5	1 1 1	1 2 1
Северо-Запад	-1 -1 1	-3 -3 -3	-1 -1 0	-2 -1 0
	-1 -2 1	-3 0 5	-1 0 1	-1 0 1
	1 1 1	-3 -3 5	0 1 1	0 1 2

Рис. 2. Маски, предложенные в работе [4] для выделения контуров

Авторы настоящей статьи предлагают "вернуться к истокам", т. е. остановиться на самом первом шаге обработки полутонового изображения — получении двумерных массивов откликов, являющихся результатом свертки исходного полутонового изображения с заранее заданными масками. Рассмотрим для примера свертку изображения с масками M_1 и M_2 , используемыми в операторе Собеля (рис. 1). Поскольку в этом алгоритме используются две маски, в результате получаются два двумерных массива откликов. Обозначим их A_1 (результат свертки с маской M_1) и A_2 (результат свертки с маской M_2). На этом этапе можно провести пороговую обработку изображения с низким значением порога, позволяющую отсеять пиксели, явно не принадлежащие контурам.

Очевидно, что каждый пиксель a может принадлежать только одному контуру. Таким образом, должно выполняться следующее условие:

$$\begin{aligned} &\text{если } |a_1| \geq |a_2|, \text{ то } a_1 = a_1 \text{ и } a_2 = 0; \\ &\text{если } a_1 < |a_2|, \text{ то } a_1 = 0 \text{ и } a_2 = a_2. \end{aligned}$$

Учитывая знак направления градиента, каждый из массивов A_1 и A_2 разбиваются на два массива (обозначим их A_1^+ , A_1^- , A_2^+ и A_2^-) согласно следующим условиям:

$$\begin{aligned} &\text{если } a_1 > 0, \text{ то } a_1^+ = a_1 \text{ и } a_1^- = 0; \\ &\text{если } a_1 < 0, \text{ то } a_1^+ = 0 \text{ и } a_1^- = |a_1|; \\ &\text{если } a_2 > 0, \text{ то } a_2^+ = a_2 \text{ и } a_2^- = 0; \\ &\text{если } a_2 < 0, \text{ то } a_2^+ = 0 \text{ и } a_2^- = |a_2|. \end{aligned}$$

Результатом предложенной обработки являются четыре изображения, на каждом из которых присутствуют только контуры соответствующих направлений.

Вместо двух ортогональных масок целесообразно применить один из наборов масок, предложенных в работе [4], настроенных не только на направления "вертикаль" — "горизонталь", но и на две диагонали. Пример такого набора приведен на рис. 2. Для удобства введены обозначения направлений согласно компасу. Так, маска, обозначенная как "Север", настроена для выделения градиента с направлением "Север—Юг" (т. е. градиент направлен по вертикали). Для краткости на рис. 2 приведены маски только для четырех направлений. Очевидно, что маска "Юг" может быть получена из маски "Север" поворотом на 180° и т. п. В результате свертки исходного изображения с каждой из предложенных масок, при выполнении условия "каждая точка принадлежит только одному контуру" и с учетом знака направления градиента получаем восемь контурных изображений, на каждом из которых присутствуют только точки, принадлежащие контурам заданного диапазона направлений.

Алгоритм выделения контуров с помощью "компасных" масок

Шаг 1. Выполнение операции свертки исходного изображения с каждой из входящих в набор масок. В результате получается набор из n изображений, где n — число масок в наборе. Значение яркости каждого из пикселей i -го изображения равно значению отклика, полученного в результате применения i -й маски.

Шаг 2. Пороговая обработка каждого из полученных изображений. Значение яркости каждого пикселя обнуляется, если оно ниже установленного порога. В противном случае значение не меняется. Порог может быть установлен как для каждого изображения в отдельности, так и единый для всех изображений.

Шаг 3. Бинаризация каждого из полученных контурных изображений. Значение яркости пикселя i -го изображения устанавливается равным единице, если оно больше значений яркости данного пикселя на всех остальных изображениях. В противном случае значение яркости пикселя устанавливается равным нулю.

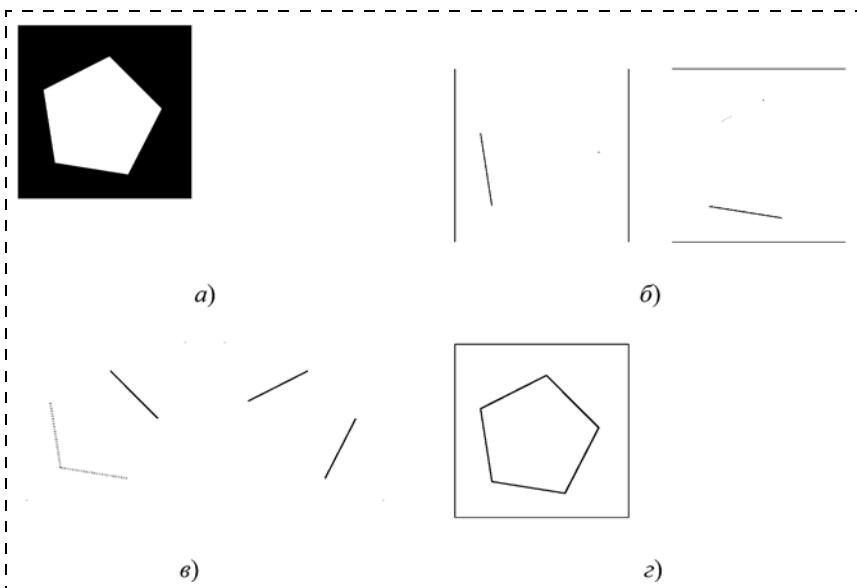


Рис. 3. Выделение контуров на тестовом изображении:

a — исходное изображение; b — результат свертки с масками "Запад—Восток" и "Север—Юг"; c — результат свертки с масками "Юго-Запад—Северо-Восток" и "Северо-Запад—Юго-Восток"; d — результирующее контурное изображение, полученное как сумма всех результатов свертки



Рис. 4. Полутоновое изображение сцены промышленно-городской застройки, полученное в видимом диапазоне в плохих погодных условиях

Шаг 4. Дополнительная обработка. На этом шаге могут быть выполнены дополнительные операции, например, утончение контуров и удаление контуров с числом точек, меньшим заданного порога.

Шаг 5. Все контурные изображения суммируются.

На рис. 3 проиллюстрировано применение алгоритма на тестовом примере: представлены тестовое изображение, контурные изображения, полученные в результате применения четырех "компасных" масок (*шаг 3 алгоритма*) и результирующее контурное изображение (*шаг 5 алгоритма*).

Анализ предложенного алгоритма позволяет сделать предположение о том, что алгоритм позволит достаточно хорошо избавляться от "ненужной информации" в виде "помеховых контуров", появляющихся в результате присутствия на изображении мелких объектов и текстур, не затрагивая при этом контуры интересующих нас объектов. Объяснение этому достаточно простое. Крупные техногенные объекты в большинстве случаев дают достаточно протяженные контуры большим радиусом кривизны. Направление градиента яркости вдоль такого контура меняется плавно. В результате обработки изображения предложенным алгоритмом такой контур окажется целиком на одном контурном изображении, соответствующем данному направлению градиента.

Кontуры шумов, текстур и мелких объектов часто меняют направление. В результате один контур разбивается на несколько более мелких контуров (в зависимости от направления каждого участка контура). Каждый из этих мелких контуров попадает на свое контурное изображение. На *шаге 4* предложенного алгоритма такие мелкие контуры могут быть удалены.

Дальнейшее тестирование предложенного алгоритма было проведено на изображениях реальных многообъектных сцен промышленно-городской застройки, полученных в видимом диапазоне в различных погодных условиях. Далее приведены несколько примеров полученных результатов.

Результаты тестирования

Возьмем в качестве примера изображение реальной многообъектной сцены промышленно-городской застройки, полученное в видимом диапазоне в плохих погодных условиях (рис. 4). Сцена отличается тем, что на ней

присутствуют крупные объекты, находящиеся на различных дальностях, а также мелкие объекты, растительность и текстуры. На рис. 5 и 6 приведены результаты обработки исходного изображения операторами Собеля и Канни. На рис. 7 приведен результат обработки исходного изображения предложенным алгоритмом. На *шаге 1* обработки были использованы маски типа Робинсон (2) (см. рис. 2).

Для того чтобы оценить преимущества изображения, приведенного на рис. 7, необходимо вернуться к постановке задачи и вспомнить, что речь идет о задаче сопоставления эталонного и текущего контурных изображений (ЭИ и ТИ). При этом в рамках решения этой задачи эталонное контурное изображение можно рассматривать как набор элементов контуров объектов, присутствующих на сцене (пример ЭИ для рассматриваемой сцены приведен на рис. 8). При такой постановке очевидно, что результаты сопоставления ЭИ и ТИ тем лучше, чем больше элементов контуров, присутствующих на ЭИ, присутствуют на ТИ и чем меньше на ТИ "лишних" элементов контуров, т. е. элементов контуров, не присутствующих на ЭИ.

Например, стоит обратить внимание на то, как хорошо оператор Канни выделил контуры от растительности, дымов и различных мелких объектов и текстур, которых нет в ЭИ.

Более того, априорная информация о направлении контуров объектов, присутствующих на ЭИ, позволяет дополнительно "очистить" ТИ от ненужных контуров. Так, в данном случае на ЭИ рассматриваемой сцены (рис. 8) присутствуют только вертикальные и горизонтальные контуры. Соответственно, на *шаге 5* предлагаемого алгоритма из рассмотрения были исключены контурные изображения, соответствующие диагональным контурам (т. е. были просуммированы только изображения с элементами вертикальных и горизонтальных контуров).

Рассмотрим для примера еще одну сцену (рис. 9). Интересующим нас объектом является мост, который и будет присутствовать на ЭИ (рис. 10). Соответственно, любые элементы контуров, не принадлежащие мосту, будут "помеховыми".

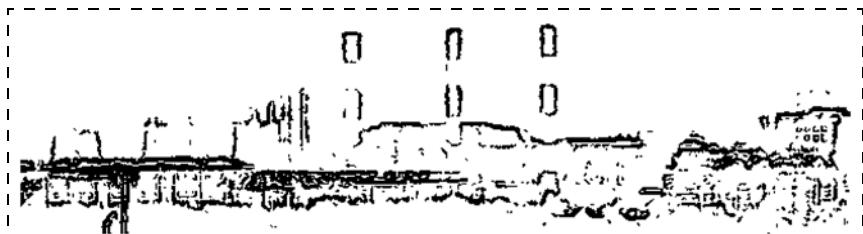


Рис. 5. Результат обработки изображения, представленного на рис. 4, оператором Собеля (с последующей пороговой обработкой)

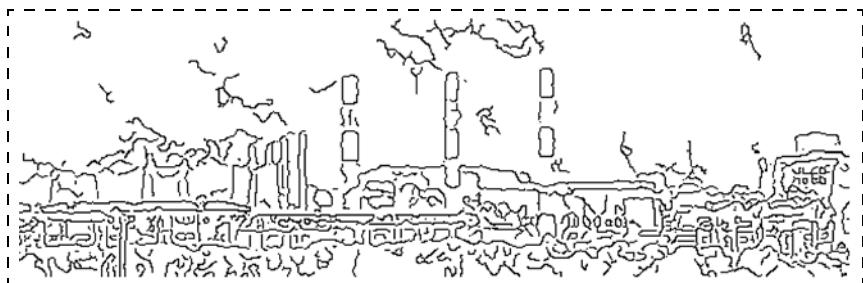


Рис. 6. Результат обработки изображения, представленного на рис. 4, оператором Канни

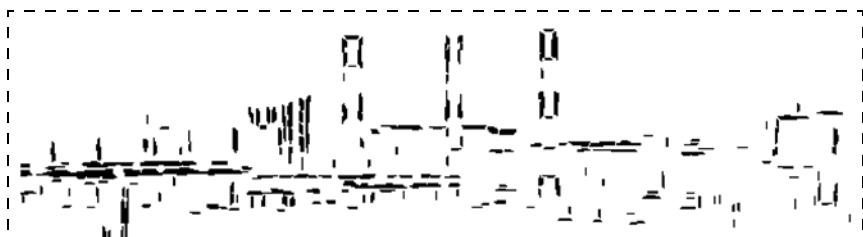


Рис. 7. Результат обработки изображения, представленного на рис. 4, предложенным алгоритмом

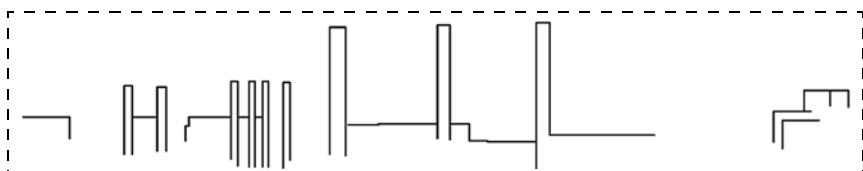


Рис. 8. Этalonное изображение для сцены, представленной на рис. 4



Рис. 9. Полутоновое изображение железнодорожного моста над рекой

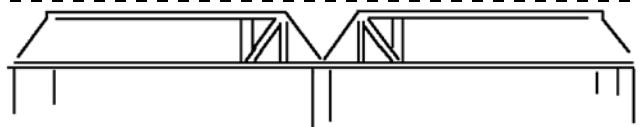


Рис. 10. Эталонное изображение моста

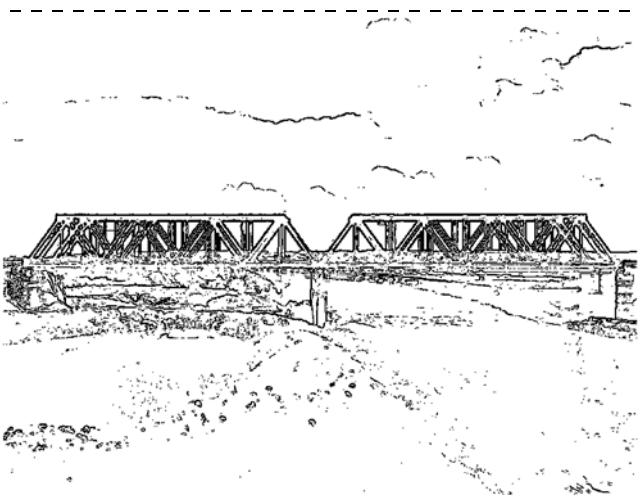


Рис. 11. Результат обработки оператором Собеля

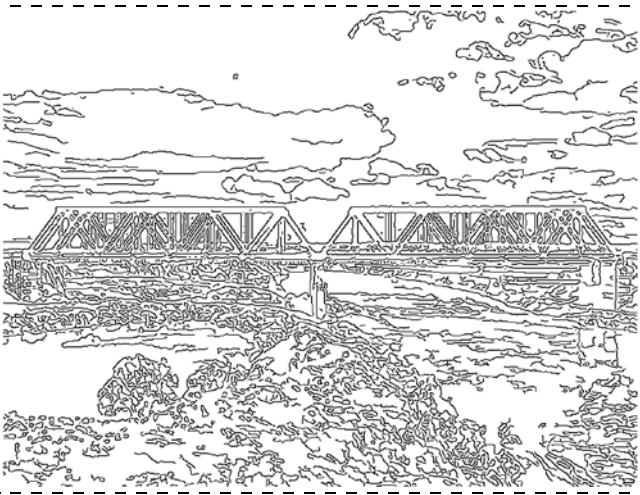


Рис. 12. Результат обработки оператором Канни

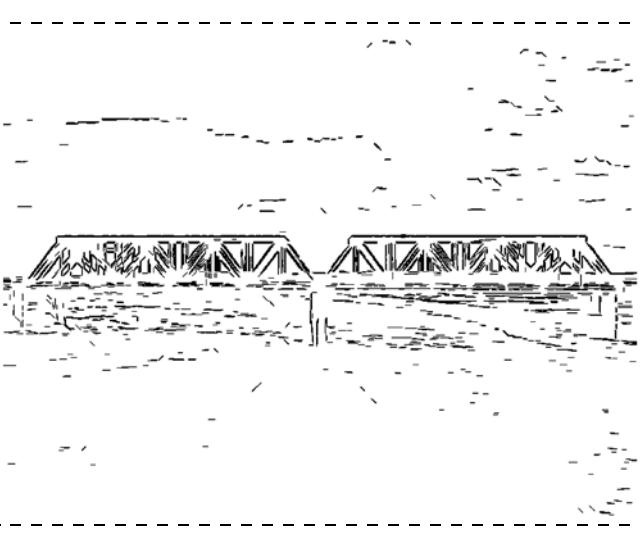


Рис. 13. Результат обработки предложенным алгоритмом

Как и в предыдущем случае, для сравнения используем выделение контуров с применением операторов Собеля и Канни (рис. 11 и 12), а также с помощью предложенного алгоритма (рис. 13).

Как и в первом примере, в результате применения операторов Собеля и Канни на контурном изображении проявляется большое число ненужных контуров (контуры облаков, растительности).

Применение предложенного алгоритма, позволяющего разделить контурное изображение на несколько слоев с учетом направления контуров, дает возможность в значительной мере избавиться от этих ненужных контуров.

Заключение

Особенностью предложенного алгоритма является применение набора контурных операторов к исходному полутональному изображению, что позволяет получить набор контурных изображений, каждое из которых соответствует контурам одного достаточно узкого диапазона направлений.

Проведенное на ряде изображений сложных сцен тестирование предложенного алгоритма показывает, что алгоритм позволяет достаточно хорошо избавляться от ненужной информации в виде "помеховых контуров", появляющихся в результате присутствия на изображении мелких объектов и текстур, не затрагивая при этом контуры интересующих нас крупных техногенных объектов.

Использование предложенного алгоритма в задачах сопоставления ТИ и контурного ЭИ позволяет использовать априорную информацию о направлении контуров ЭИ. Контурные изображения, соответствующие направлениям контуров, не представленных в ЭИ, не рассматриваются.

В результате применения предложенного алгоритма сохраняется информация о направлениях контуров, что позволяет упростить дальнейшую обработку (например, при использовании преобразования Хафа).

Список литературы

1. Инсаров В. В. Структурно-лингвистический алгоритм обработки изображений и распознавания образов наземных сцен в системе наведения летательного аппарата // Известия РАН. Теория и системы управления. 2004. № 1. С. 145–154.
2. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / Под ред. М. Н. Красильщикова и Г. Г. Себрякова. М.: Физматлит, 2003. С. 156–184.
3. Гнилицкий В. В., Инсаров В. В. Обнаружение и локализация объектов на изображениях трехмерных наземных сцен // Известия РАН. Теория и системы управления. 2011. № 6. С. 79–87.
4. Pratt W. K. Digital Image Processing (Fourth edition). Wiley, 2007. 807 р.

Gradient Approach to the Task of Contour Extraction of Big Anthropogenic Objects in the Images of Multi-Object Ground Scenes

V. V. Insarov¹, wiliam@gosniias.ru, S. V. Tikhonova¹, svetico@yandex.ru,
A. V. Rankova², anastasy.rankova@gmail.com, D. A. Fortinsky², mitia.fortinsky@yandex.ru,
¹ State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, 125319, Russian Federation,
² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Received on January 26, 2015

The tasks of navigation and guidance of the unmanned maneuverable aircraft often involve a problem of detection and recognition of the land scene objects based on comparison of the priori and posteriori information (reference and observed images, respectively). Such a comparison allows us to localize the sought objects on the observed image and to define values of the current coordinates of these objects. The most stable features of the current image bearing information on the geometry of objects of an observed scene are the edges of the images of the objects of a scene, their placement and their direction. This information could be obtained from the brightness gradients. In this article the authors consider possible modification of the edges detection algorithm in relation to the solution of the problem of detection of contours of large technogenic objects in the image of a multi-object scene. This modification makes it possible to take into consideration the direction of the detected edges. The purpose of the proposed modification is reduction of the contours of the textures and small objects. Such edges often change their directions, respectively, they are broken into a number of small edges of different directions. Later such edges can be excluded from the consideration. At the same time the contours (edges) of large technogenic objects seldom change their directions. These contours bear the most useful and exact information about separate objects and a scene as a whole. The proposed edge detection algorithm was tested on the image of a real multi-object scene. Advantage of the proposed algorithm in comparison with the other known algorithms is demonstrated in application to the considered type of scenes.

Keywords: image processing, edge detection, object selection, ground scene, image processing algorithms, reference image, current image

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 14-08-00621 a

For citation:

Insarov V. V., Tikhonova S. V., Rankova A. V., Fortinsky D. A. Gradient Approach to the Task of Contour Extraction of Big Anthropogenic Objects in the Images of Multi-Object Ground Scenes, *Mekhanika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 6, pp. 415–421.

DOI: 10.17587/mau.16.415-421

References

1. Insarov V. V. Strukturno-lingvisticheskii algoritm obrabotki izobrazhenii i raspoznavaniya obrazov nazemnykh stsen v sisteme navedeniya letatel'nogo appara (Structural and linguistic algorithm for image processing and recognition of patterns in aerial images in the guidance system of an aircraft), *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2004, vol. 43, no. 1, pp. 136–144 (in Russian).

2. Krasil'shchikov M. N., Sebryakov G. G. ed. *Upravleniye i navedeniye bespilotnykh manevrennykh letatel'nykh apparov na osnove sovremennykh informatsionnykh tekhnologiy* (Guidance and control of unmanned aerial vehicles maneuvering on the basis of modern information technology), Moscow, Fizmatlit, 2003, pp. 156–184 (in Russian).

3. Gnilitskii V. V., Insarov V. V. Obnaruzhenie i lokalizatsiya ob'ektov na izobrazheniyakh trekhmernykh nazemnykh stsen (Detection and Localization of Objects in images of 3D ground scenes), *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2011, vol. 50, no. 6, pp. 933–941 (in Russian).

4. Pratt W. K. *Digital Image Processing*, Wiley, 2007, 807 p.

Corresponding author:

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

ИНФОРМАЦИЯ

19–22 октября 2015 г.
в Москве в ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН состоится

18-я Международная конференция DCCN—2015

Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь

Тематика конференции:

- Оптимизация архитектуры компьютерных и телекоммуникационных сетей
- Управление в компьютерных и телекоммуникационных сетях
- Оценка производительности и качества обслуживания в беспроводных сетях
- Аналитическое и имитационное моделирование сетевых протоколов
- Теория очередей и теория надежности
- Беспроводные сети, функционирующие под управлением стандартов: IEEE 802.11, IEEE 802.15, IEEE 802.16 и UMTS (LTE)
- RFID-технологии и их применение в интеллектуальных транспортных сетях
- Методы проектирования протоколов MAC-уровня и управления в MESH-сетях сантиметрового и миллиметрового диапазона радиоволн
- Internet- и web-приложения и сервисы
- Интеграция приложений в распределенных информационных системах
- Большие данные в компьютерных и телекоммуникационных сетях

Подробную информацию о конференции см. на сайте:
<http://www.dccn2015.com>

СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ

УДК.621.3.049.79

С. П. Тимошенков¹, д-р техн. наук, проф., spt@miee.ru,

В. В. Калугин¹, д-р техн. наук, проф., victor118@mail.ru,

Н. М. Парфёнов², канд. техн. наук, доц., sedennik@mail.ru, С. А. Анчутин², вед. инженер,

Е. С. Кочурина¹, канд. техн. наук, инженер, Д. Ж. Мукимов¹, инженер-конструктор,

Чжо Мьё Аунг¹, аспирант,

¹ МИЭТ (национальный исследовательский университет),

² МАИ (национальный исследовательский университет)

Исследование и разработка методов оценки основных параметров микромеханических преобразователей линейного ускорения

Изложен метод оценки основных параметров (смещение нуля, крутизна выходной характеристики (масштабный коэффициент и т. д.) микроЭлектромеханических преобразователей линейного ускорения (ПЛУ). Приведены методы оценки статических и случайных ошибок ПЛУ.

Рассматривается разработанный микромеханический ПЛУ (акселерометр), предназначенный для систем навигации, ориентации, стабилизации, управления движением и наведения различных объектов. Анализ статических характеристик микромеханических ПЛУ проведен с помощью метода наименьших квадратов. Случайные ошибки параметров акселерометра оцениваются с помощью вариации Алана — характеристики шума и других параметров, представляющей собой функцию от времени усреднения. Приведены результаты оценки статических параметров ПЛУ, проведенной с использованием центрифуги с микропроцессорным управлением и программированием режимов, позволившей повысить точность расчета параметров.

Ключевые слова: преобразователи линейного ускорения, статические и случайные ошибки, выбростенд, центрифуга

Введение

Современные микроэлектромеханические (МЭМ) преобразователи все чаще используются в навигации и системах управления авиационно-космической техникой и постепенно вытесняют дорогие электромеханические датчики.

Разработанный МЭМ преобразователь линейного ускорения (акселерометр) предназначен для систем навигации, ориентации, стабилизации, управления движением и наведения различных объектов. Важнейшим этапом в процессе создания и эксплуатации изделия является оценка его основных параметров, поэтому разработка методов оценки параметров микромеханических преобразователей является востребованной и актуальной.

Аналитические исследования преобразователей линейного ускорения с помощью метода наименьших квадратов

На основании экспериментальных данных, содержащих случайные ошибки, был проведен расчет параметров разрабатываемых МЭМ преобразователей линейного ускорения с помощью метода наименьших квадратов (МНК), минимизирующего разницу между экспериментальными и теоретическими значениями параметров МЭМ преобразователей. Это позволило рассчитать параметры модели с минимальной погрешностью. Мерой разницы

в МНК послужила сумма квадратов отклонений действительных (экспериментальных) значений от теоретических [1—3].

Значение выходного сигнала микроэлектромеханического ПЛУ можно записать следующим образом:

$$U_{\text{вых}_i}(a_i) = K_0 + K_1 a_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где $U_{\text{вых}_i}(a_i)$ — выходной сигнал; a_i — измеряемое ускорение на i -м эксперименте; K_0 — смещение нуля; K_1 — крутизна выходной характеристики (масштабный коэффициент); n — число проведенных экспериментов.

Перепишем выражение (1) в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} U_{\text{вых}1}(a_1) \\ \dots \\ U_{\text{вых}n}(a_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a_1 \\ \dots & \dots \\ 1 & a_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_0 \\ K_1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Обозначив $U = \begin{bmatrix} U_{\text{вых}1}(a_1) \\ \dots \\ U_{\text{вых}n}(a_n) \end{bmatrix}$ — вектор значений

выходного сигнала; $A = \begin{bmatrix} 1 & a_1 \\ \dots & \dots \\ 1 & a_n \end{bmatrix}$ — вектор задава-

мых ускорений; $K = \begin{bmatrix} K_0 \\ K_n \end{bmatrix}$ — вектор искомых коэффициентов, перепишем выражение (1) следующим образом:

$$U = AK. \quad (3)$$

Согласно МНК вектор искомых коэффициентов можно найти по формуле

$$K = (A^T A)^{-1} A^T U. \quad (4)$$

Согласно изложенному методу можно определить, в частности, следующие параметры микромеханического акселерометра: смещение нуля (K_0); значение масштабного коэффициента (K_1).

Исследование случайных ошибок параметров преобразователей линейного ускорения

Для оценки случайных ошибок параметров разрабатываемых МЭМ преобразователей линейного ускорения будем использовать вариацию Алана [3, 4]. Вариация Алана — характеристика шума и других параметров, представляющая собой функцию от времени усреднения.

Пусть N — число значений записанного выходного сигнала преобразователя с шагом дискретизации по времени τ_0 . Сформируем из полученных значений выходного сигнала K групп по M значений в каждой ($K = N/M$) [4, 5]:

$$\underbrace{U_{\text{вых}1}, U_{\text{вых}2}, \dots, U_{\text{вых}M}}_{k=1}, \underbrace{U_{\text{вых}M+1}, \dots, U_{\text{вых}2M}}_{k=2}, \dots, \underbrace{U_{\text{вых}N-M}, \dots, U_{\text{вых}N}}_{k=K}. \quad (5)$$

Для каждой полученной группы рассчитаем среднее значение [3]:

$$\bar{U}_k(M) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M U_{\text{вых}(k-1)M+i}, k = 1, \dots, K. \quad (6)$$

Далее необходимо рассчитать вариацию Алана для данного числа точек группы [4]:

$$\sigma_A^2(\tau_M) \cong \frac{1}{2(K-1)} \sum_{k=1}^{K-1} (\bar{U}_{k-1}(M) - \bar{U}_k(M))^2, \quad (7)$$

где $\tau_M = M/f_s$ — время корреляции; f_s — частота дискретизации.

Точность оценки с помощью вариации Алана λ , измеряемая в процентах, повышается с увеличением числа групп K :

$$\lambda = \frac{100}{\sqrt{2(K-1)}}. \quad (8)$$

Для получения оценки вариации Алана с точностью λ в одной группе должно быть не более $M \leq \frac{N\lambda^2}{(5000 + \lambda^2)}$ значений выходного цифрового кода, где λ — допустимая относительная погрешность определения вариации Алана, устанавливаемая для конкретной категории испытаний. Итерация повторяется для $M = 2, \dots, \frac{N\lambda^2}{(5000 + \lambda^2)}$. Таким образом, для получения оценки Алана с точностью до 10 % необходимо проводить разбиение на 51 группу, с точностью 5 % — на 201 группу.

Вариацию Алана можно представить следующим образом [4]:

$$\sigma_A(\tau_j) = \sqrt{\sigma_{\text{total}}^2} = \sqrt{\sum_{n=-2}^2 A_n^2 \tau_j^n}, j = 1, \dots, M, \quad (9)$$

отсюда

$$\begin{aligned} \sigma_A^2(\tau_j) &= \frac{A_{-2}^2}{\tau_j^2} + \frac{A_{-1}^2}{\tau_j} + A_0^2 + A_1^2 \tau_j + A_2^2 \tau_j^2 = \\ &= \sum_{n=-2}^2 B_n \tau_j^n, \end{aligned} \quad (10)$$

где $B_n = A_n^2$, $n \in \{-2, -1, 0, 1, 2\}$.

С учетом достаточно большого массива значений выходного сигнала уравнение (10) можно решить методом наименьших квадратов. Для этого перепишем его следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_A^2(\tau_1) \\ \dots \\ \sigma_A^2(\tau_M) \end{array} \right\} = \left[\begin{array}{ccccc} \frac{1}{\tau_1^2} & \frac{1}{\tau_1} & 1 & \tau_1 & \tau_1^2 \\ \vdots & & & & \\ \frac{1}{\tau_M^2} & \frac{1}{\tau_M} & 1 & \tau_M & \tau_M^2 \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{l} B_{-2} \\ B_{-1} \\ B \\ B_1 \\ B_2 \end{array} \right\}. \quad (11)$$

Таким образом, выражение (10) можно записать в виде

$$\sigma = TB. \quad (12)$$

Таблица 1
Случайные параметры разрабатываемых
МЭМС преобразователей [3]

Тип погрешности	Вариация Алана	Параметр
Шум квантования, $\sigma_{\text{quant}}^2(\tau)$	$\frac{3Q^2}{\tau^2}$	Q — коэффициент шума квантования
Случайное блуждание скорости, $\sigma_{\text{arw}}^2(\tau)$	$\frac{N^2}{\tau}$	N — случайное блуждание скорости
Случайный дрейф нулевого сигнала, $\sigma_{\text{bias}}^2(\tau)$	$\frac{2B^2}{\pi} \ln(2)$	B — нестабильность нуля
Случайное блуждание ускорения, $\sigma_{\text{rrw}}^2(\tau)$	$K^2 \frac{\tau}{3}$	K — случайное блуждание ускорения
Тренд, $\sigma_t^2(\tau)$	$\frac{R^2 \tau^2}{2}$	R — тренд ускорения
Гармоническая помеха, $\sigma_{\text{sn}}^2(\tau)$	$\Omega_0^2 \left(\frac{\sin^2(\pi f_0 \tau)}{\pi f_0 \tau} \right)$	f_0 — частота гармонической помехи, Ω_0 — амплитуда гармонической помехи

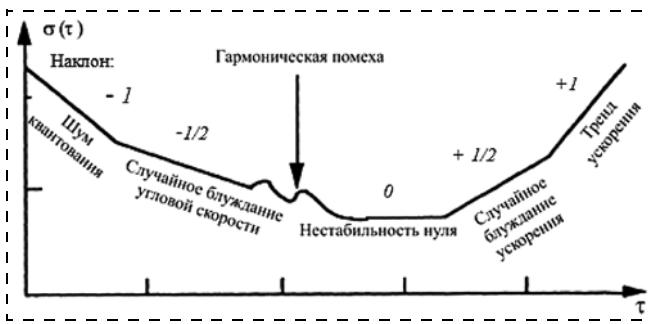


Рис. 1. График зависимости вариации Алана от времени [4]

Согласно МНК вектор искомых коэффициентов равен

$$B = (T^T T)^{-1} T^T \sigma. \quad (13)$$

Получив значения коэффициентов B_n и учитывая выражение для суммарной погрешности выходного сигнала преобразователя $\sigma^2 = \sigma_{quant}^2 + \sigma_{arw}^2 + \sigma_{bias}^2 + \sigma_{rrw}^2 + \sigma_{sn}^2 + \sigma_t^2$ (табл. 1), можно определить значение каждого из коэффициентов.

В табл. 1 указаны типы случайных параметров разрабатываемых МЭМ преобразователей и аналитические выражения для соответствующих вариаций Алана. На рис. 1 показана типовая диаграмма Алана с указанием искомых параметров преобразователей.

Кривая, соответствующая квадратному корню из вариации Алана, нанесенная на двойную логарифмическую сетку, определяет случайные параметры разрабатываемых МЭМ преобразователей.

Исследование параметров образцов акселерометров с помощью испытательного оборудования

Исследование статических параметров разрабатываемых датчиков линейного ускорения проводили с помощью центрифуги, а динамических — с помощью вибростенда.

Основным оборудованием для определения статических параметров разрабатываемых МЭМ ПЛУ была центрифуга. В данном случае испытательный стенд был собран на базе центрифуги Acutronic 1135S (рис. 2, см. третью сторону обложки).

Образец датчика линейного ускорения помещают в крепежную оснастку на центрифуге. Поворотный стол центрифуги обычно вращается в горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси так, что на испытываемый МЭМ ПЛУ вдоль поворотного стола действует ускорение: $a = R\omega^2$, где R — длина плеча поворотного стола, ω — угловая скорость вращения центрифуги (рис. 3) [5—10].

Для подачи стабильного питания на испытываемые образцы ПЛУ необходимо использовать источник питания, который позволяет получать плавное регулируемое стабилизированное напряжение около 3 В и ток ~ 15 мА.

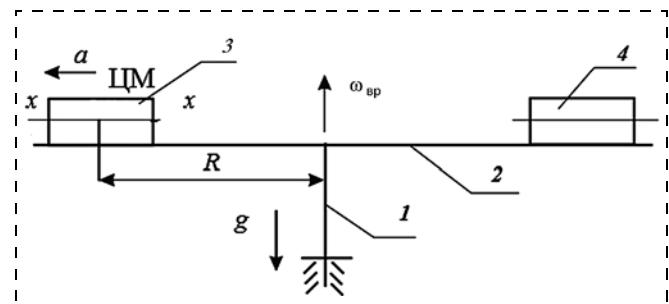


Рис. 3. Упрощенная схема расположения испытываемых образцов микромеханических ПЛУ на центрифуге:

1 — ось вращения центрифуги; 2 — поворотный стол; 3, 4 — испытываемые образцы [10]

Исследование динамических параметров разрабатываемых МЭМ ПЛУ проводили на вибростенде Bruel 4809 с усилителем Power Amp 2718 (ФРГ).

Для формирования необходимого вибрационного воздействия на испытываемый образец ПЛУ оператору необходимо установить параметры вибрации, программно задаваемые с помощью компьютера. Далее сигнал попадает на управляющую систему, которая генерирует электронный сигнал, инициирующий заданное колебательное движение головной части вибростенда [6, 8]. Если сигнал, полученный с контрольного акселерометра, расположенного на головной части вибростенда, показывает, что выход вибростенда отличается от желаемого, то выполняется подстройка сигнала управляющей системой таким образом, чтобы выход вибростенда приближался к профилю испытания.

Выводы

1. Таким образом, МНК позволяет определить такие параметры ПЛУ, как смещение нулевого сигнала (K_0) и масштабный коэффициент (K_1).

Таблица 2
Результаты измерений основных параметров акселерометров

Контролируемый параметр	Диапазон измеряемых ускорений		
	1,2g	5g	10g
Масштабный коэффициент, B/g	1,971	0,504	0,260
Нелинейность статической характеристики, %	0,067	0,076	0,108
Смещение нуля, g	$1,728 \cdot 10^{-3}$	$-7,649 \cdot 10^{-3}$	$57,3 \cdot 10^{-3}$
Частотный диапазон преобразования, Гц	160	147	140
Разрешающая способность, % от диапазона	0,3		
Спектральная плотность мощности шума, $g/\sqrt{\text{Гц}}$	$1,319 \cdot 10^{-5}$	$3,534 \cdot 10^{-5}$	$1,20 \cdot 10^{-4}$
Время готовности, с	0,132	0,110	0,0948
Нестабильность масштабного коэффициента в запуске в нормальных условиях, %	0,110	0,1	0,12

2. Случайные ошибки параметров разрабатываемых МЭМ ПЛУ могут быть определены с помощью варииации Алана, что позволяет существенно повысить точность измерений до $\pm 0,01$.

3. В результате исследований с помощью испытательного оборудования были определены основные параметры акселерометров (табл. 2). Для изготовленных пилотных образцов диапазон ускорений составил $\pm 1,2 \dots \pm 10 \text{ g}$, частотный диапазон 140...160 Гц.

Список литературы

1. Бойко А. Н., Заводян А. Р., Симонов Б. М. Моделирование элементов конструкции и изготовление // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. 2009. № 8. С. 100–103.

2. Панов А. П. Математические основы теории инерциальной ориентации. Киев: Наукова думка, 1995. 280 с.

3. Мокров Е. А. Краткий анализ методов испытаний инерциальных МЭМС-датчиков // Датчики и системы. 1995. № 10. С. 18–20.

4. Синельников А. Е. Низкочастотные линейные акселерометры. Методы и средства поверки и градуировки. М.: Изд-во стандартов, 1979. 175 с.

5. Pavelescu I., Georgescu I., Guran D. E., Cobianu C. P. Patent США на изобретение US 7784344. Integrated MEMS 3D multi-sensor; Honeywell International Inc. (US). Опубл. 31.08.2010. 14 с.

6. Малышев Р. А. Краткий анализ методов испытаний инерциальных МЭМС-датчиков // Датчики и системы. 2011. № 8. С. 64–66.

7. Sun Y., Kim K. Patent США на изобретение US 8317245. MEMS-based micro and nano grippers with two-axis force sensors / Опубл. 27.11.2012. 7 с.

8. Байрак В. В., Шарков М. В. Стенд для испытаний изделий на совместное воздействие вибрационных и линейных ускорений. Патент. G01M7/02 Опублик. 10.08.2010.

9. Caruso M. J., Bratland T., Smith C. H., Schneider R. A New Perspective on Magnetic Field Sensing // Sensor. Expo proceedings. 1998. Р. 195–213.

10. Катомин Н. Н. Испытания гироскопов и акселерометров: Учеб. пособие. М.: Изд. МАТИ, 1993. 94 с.

Research and Development of the Methods for Estimation of the Basic Parameters of the Micromechanical Transducers of Linear Acceleration

S. P. Timoshenkov¹, spt@miee.ru, V. V. Kalugin¹, victor118@mail.ru,
N. M. Parfenov², sedennik@mail.ru, S. A. Antchutin², E. S. Kochurina¹, D. W. Mukimov¹, Jo Had Aung¹

¹ MIET (National Research University), Moscow, 124498, Russian Federation

² MAI (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation

Received on December 16, 2015

The article describes the methods for evaluation of the basic parameters using the least squares (zero offset, slope of the output characteristics (scale factor), and so on) of the micromechanical transducers of linear acceleration (PLD). It also contains studies of the static and random errors of the micromechanical transducers of linear acceleration (accelerometers) and random errors of the measurement parameters using the least squares method, and Alan variations. Due to minimization of the experimental and theoretical values of the measured parameters and the least squares method it became possible to significantly reduce the measurement error. The accuracy of the measured values of the accelerometer using Alan variations was significantly improved due to an increase of the number of partitions of points in the group. So, in the split points in group 51 the accuracy was equal to 10 % and in group 201 to 5 %. The authors considered two ways for estimation of the parameters of a linear acceleration sensor: a static one, using centrifuges, and a dynamic one with testing on a shaker. As is known, a linear acceleration can occur due to the rectilinear, curvilinear and rotational movements. Since in this case the subject of interest is the linear acceleration, the play will be performed using the rotational motion of the centrifuge. The rotational motion and the linear motion depend on the distance of a product to the center of rotation of the table and the speed. The measurement result will depend on the values of the device parameters and characteristics of the test modes of a centrifuge. Because the effects of vibration of a product may cause mechanical defects or deterioration of the values of the parameters, of great importance is vibration testing on a vibration table. The main requirement to the test bench is a reproduction of vibration in a predetermined frequency range and mode for a set time and with a given accuracy.

Keywords: transducers of linear acceleration, static and random errors, shaker, centrifuge

For citation:

Timoshenkov S. P., Kalugin V. V., Parfenov N. M., Antchutin S. A., Kochurina E. S., Mukimov D. W., Jo Had Aung. Research and Development of the Methods for Estimation of the Main Parameters of the Micromechanical Transducers of Linear Acceleration, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 5, pp. 422–425.

DOI: 10.17587/mau.16.422-425

References

1. Boiko A. N., Zavodyan A. R., Simonov B. M. Modelirovaniye elementov konstruktsii i izgotovlenie (Simulation of structural elements and manufacturing), *Elektronika. Nauka. Tekhnologiya. Biznes*, 2009, no. 8, pp. 100–103 (in Russian).

2. Panov A. P. Matematicheskie osnovy teorii inertsial'noi orientatsii (Mathematical foundations of the theory of inertial orientation), Kiev, Naukova dumka, 1995, 280 p. (in Russian).

3. Mokrov E. A. Kratkii analiz metodov ispytanii inertsial'nykh MEMS-datchikov (Short analysis of test methods inertial MEMS sensors), *Datchiki i sistemy*, 1995, no. 10, pp. 18–20 (in Russian).

4. Sinel'nikov A. E. Nizkochastotnye lineinye akcelerometry. Metody i sredstva poverki i graduirovki (Low-frequency linear accelerometers. Methods and tools for testing and calibration), Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1979, 175 p. (in Russian).

5. Pavelescu I., Georgescu I., Guran D. E., Cobianu C. P. Patent SShA na izobretenie US 7784344. Integrated MEMS 3D multi-sensor; Honeywell International Inc. (US). Опубл. 31.08.2010. 14 p.

6. **Malyshev R. A.** Kratkii analiz metodov ispytanii inertial'nykh MEMS-datchikov (Short analysis of test methods inertial MEMS sensors), *Datchiki i Sistemy*, 2011, no. 8, pp. 64–66 (in Russian).
7. **Sun Y., Kim K.** Patent SShA na izobretenie US 8317245. MEMS-based micro and nano grippers with two-axis force sensors. Opubl. 27.11.2012. 7 p.
8. **Bairak V. V., Sharkov M. V.** Stend dlya ispytanii izdelii na soveshnoe vozdeistvie vibratsionnykh i lineinykh uskorenii. Patent (Stand for testing of products on conscientious impact vibration and linear accelerations. Patent) G01M7/02 Opublik. 10.08.2010 (in Russian).
9. **Caruso M. J., Bratland T., Smith C. H., Schneider R.** A New Perspective on Magnetic Field Sensing, *Sensor. Expo proceedings*, 1998, pp. 195–213.
10. **Katomin N. N.** Ispytaniya giroskopov i akcelerometrov (Tests of gyroscopes and accelerometers), Moscow, Published in MATI, 1993, 94 p. (in Russian).

Corresponding author:

Parfenov Nikolay M., Ph. D., Associate Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation, e-mail: sedennik@mail.ru

УДК 629.13(075.8)

A. С. Девятисильный, д-р техн. наук, проф., зав. сектором управления и навигации, devyatis@iacp.dvo.ru,
А. К. Стоценко, аспирант, stotsenko@iacp.dvo.ru,
 Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток

Модели управления относительным движением двух сухопутных транспортных единиц в задаче следования за лидером

Предложены и исследованы теоретико-механические модели управляемого продольного движения пары (звена) роботизированных транспортных единиц, движущихся с заданной абсолютной скоростью и сохраняющих заданное расстояние между собой. Рассмотрены способы сохранения требуемого режима совместного движения при управлении со стороны каждой из транспортных единиц пары. Выявлена асимметрия этих возможностей. Приведены результаты численных экспериментов.

Ключевые слова: движение, скорость, расстояние, транспортный поток, транспортная единица, управление, обратная связь, модель

Введение

Одной из распространенных причин дорожно-транспортных происшествий является неспособность транспортного средства, движущегося в транспортном потоке, своевременно учесть изменения скорости и режима работы двигательно-тормозной системы впереди идущего участника движения. При этом ответственность за отсутствие столкновений возлагается на позади идущего [1]. По сути (де-факто), уже изложенного достаточно для актуализации исследований по управлению продольным движением с конечной целью создания математической, информационной и технической платформ, обеспечивающих решение проблемы активной безопасности движения на сухопутных транспортных магистралях. Вместе с тем, для полноты представления проблемы следует указать еще на один аспект актуальности предлагаемого исследования, который связан уже с целевой организацией группового (коллективного) движения, когда речь идет о системах экологического мониторинга и оценки параметров физических полей естественного и искусственного происхождения.

Настоящая работа посвящена теоретико-механическим моделям управляемого продольного движения двух транспортных единиц (ТЕ) — пары (звена) ТЕ — как простейшей системы коллективного (группового) поведения (движения), понимание которого существенно необходимо для последующего аналитического конструирования и исследования более сложных составных систем.

Главным образом, работа ориентирована на создание и исследование автоматических (роботизированных) систем коллективного движения (поведения); вместе с тем, в моделях управления движением выделен сегмент, который при необходимости (хотя бы по соображениям полноты методологии) можно интерпретировать как режим "ручного" (человеком-пилотом) управления, что позволяет далее, заполняя пространство между понятиями "ручной" и "автоматический", обращаться к образам полуавтоматического корректируемого движений.

Модели управления и их исследование

Начнем с модели управляемого продольного движения базового системообразующего элемента транспортного потока — отдельно взятой ТЕ, представив ее в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{R} &= V, R(0) = R_0; \\ \dot{V} &= F - S - g_v, V(0) = V_0, S = A + Q; \\ \dot{F} &= -\mu(F - \varphi(V_d) + \gamma(V - V_d) + T), F(0) = F_0, \end{aligned} \quad (1)$$

где R — расстояние, пройденное ТЕ; V — линейная скорость движения ТЕ, $V \geq 0$; F , S — удельные силы (далее — силы), F — сила, создаваемая двигательно-тормозной системой ТЕ, и S — сила сопротивления движению; $A = 0,5kV^2$ — сила аэродинамического

сопротивления [2], $0,5k$ — фактор обтекаемости, $k = 2c\rho\sigma$, c — коэффициент лобового сопротивления, ρ — плотность воздуха, $\sigma = \alpha BH/m$ — лобовая удельная площадь ТЕ, α — коэффициент заполнения лобовой площади, B и H — наибольшие ширина и высота ТЕ, m — масса ТЕ; Q — сила сопротивления качению, причем $Q = fg$ при $V > 0$, g — ускорение свободного падения, f — коэффициент сопротивления качению; T — сила торможения; g_v — проекция ускорения свободного падения на направление движения, далее полагаем $g_v = 0$; V_d — задаваемая скорость движения ТЕ, $\varphi(V_d)$ — удельная сила, реализующая задаваемое движение; $\mu = \tau^{-1}$, τ — постоянная времени реализации силы F ; γ — коэффициент обратной связи, поддерживающей режим заданного движения. Значение τ зависит от того, каким образом осуществляется управление ТЕ — в режиме так называемого ручного управления (пилотом) или в автоматическом режиме (случай роботизированной ТЕ). При пилотном управлении вероятность того, что у пилота $\tau_p \leq 0,07$ с, чрезвычайно мала; причем τ_p является показателем, описывающим моторику человека; у роботизированных ТЕ $\tau = \tau_a$ — технический параметр, и, вообще говоря, возможны значения $\tau_a < 0,07$ и $\tau_a > 0,07$. Далее примем $\tau_p = \tau^* = 0,07$ за критическое значение при пилотном управлении и, соответственно, обозначим $(\tau^*)^{-1} = \mu^*$.

Заметим, что в настоящей работе принято значение $\mu = \text{const}$, хотя μ , вообще говоря, может быть некоторой функцией времени, например, ступенчатой.

Теперь обратим внимание на следующее. Модель (1) корректна с момента времени, принимаемого за $t = 0$, начиная с которого $V > 0$, и ему при изначально неподвижной ТЕ предшествует отрезок времени длительностью Δt , на котором сила F меняется от значения $F^* < Q$ до значения $F = F_0 = Q$. Принимая $\gamma = 0$, $V_d = \text{const} > 0$ (при этом $\varphi(V_d) = kV_d^2 + Q$), находим $F_0 = F^*e^{-\mu\Delta t} + \varphi(V_d)(1 - e^{-\mu\Delta t}) = Q$

и, соответственно, $\Delta t = (\ln(kV_d^2 + Q - F^*) - \ln(kV_d^2))/\mu$. Как видим, изложенное доопределяет силу как $Q = F(\theta)$, $\Delta t \geq 0 \geq 0$. Таким образом, по сути, сила сопротивления качению отождествляется с некоторой силой сухого трения; одновременно с этим в модели (1) доопределяются возможные значения F_0 , а именно, $F_0 \geq Q$.

Систему уравнений (1) назовем *моделью ординарного управляемого движения* ТЕ. Исследуем устойчивость такого движения с заданной скоростью V_d , для чего обратимся к методологии уравнений "первого приближения" А. М. Ляпунова [3]. В предположении, что T и Q не зависят от V , эти уравнения, согласно (1), имеют вид

$$\begin{aligned}\delta V &= \delta F - S\delta V, \quad \delta V(0) = \delta V_0, \\ \delta F &= -\mu\delta F - \mu\gamma\delta V, \quad \delta F(0) = \delta F_0,\end{aligned}\tag{2}$$

где δV и δF — первые вариации переменных состояния, $S' = S'(V_d) = \frac{\delta S}{\delta V}$, $V = V_d$; очевидно, $S' > 0$.

Пусть $V_d = \text{const}$. Необходимые и достаточные условия асимптотической устойчивости системы (2), согласно критерию Рауса—Гурвица [4], принимают вид $S' + \mu > 0$, $(S' + \mu)(S' + \gamma)\mu > 0$.

Тогда, учитывая, что $S' > 0$ в силу односторонности движения, а $\mu > 0$ в силу очевидных физических представлений об инертности процесса реализации силы F , получаем область определения параметра γ : $\gamma > -S'$. Заметим, что этой области принадлежит и значение $\gamma = 0$ — случай отсутствия обратной связи по скорости. Вместе с тем, ввиду определенной фатальности значений S и μ именно наличие обратной связи по скорости обеспечивает возможность реализации желаемого состояния комфорта движения — движения без гармонических колебаний переменных состояния. В определенном смысле γ играет, таким образом, роль коэффициента комфорта. В последнем нетрудно убедиться, решив соответствующее (2) характеристическое уравнение. Следует заметить, что, говоря о комфорте движения, мы понимаем ее исключительно при анализе линейного приближения модели, а не в рамках исходных представлений о модели движения как нелинейной.

Пусть теперь $V_d = V_d(t)$. В этом случае обратимся к достаточно общему методу исследования проблемы устойчивости — методу функций Ляпунова. В качестве функции Ляпунова возьмем положительно определенную квадратичную форму $L = -q_1\delta V^2 + q_2\delta F^2$, где q_1 и q_2 — произвольные положительные константы. Тогда нетрудно убедиться, что $\dot{L} < 0$, т. е. исследуемая система с достаточностью асимптотически устойчива, если выполняются следующие условия: $S'q_1 > 0$, $\mu q_2 > 0$, $q_2\mu\gamma - q_1 = 0$, причем первые два из них выполняются автоматически, а из последнего в силу свободы выбора значений q_1 и q_2 , по сути, следует определение области допустимых значений параметра обратной связи, т. е. $\gamma \geq 0$.

Главный вывод, следующий из изложенного анализа ординарного движения ТЕ, состоит, таким образом, в том, что при значениях $\gamma \geq 0$ не происходит срыва поддержания заданной скорости ТЕ при смене режима $V_d = \text{const}$ на режим $V_d = V_d(t)$ и обратно.

Перейдем теперь к основной теме, обсуждаемой в настоящей статье, — моделям и анализу управляемого движения пары (звена) ТЕ с конечной целью оценить возможности поддержания заданной дистанции между ТЕ, обеспечивающей такой уровень безопасности движения с заданной скоростью V_d , при котором исключается наезд ведомой ТЕ (TE_2) на ведущую (TE_1 — лидер в звене).

Полагая, что движение каждой ТЕ удовлетворяет системе уравнений (1), и обозначая индексами $i = \overline{1, 2}$ соответствующие TE_1 и TE_2 переменные

состояния (R , V , F) и параметры, запишем уравнения относительного движения ТЕ, а именно:

$$\begin{aligned}\dot{r} &= v, \quad r(t_m) = r_m, \\ \dot{v} &= F_1 - S_1 - F_2 + S_2, \quad V(t_m) = V_m,\end{aligned}\quad (3)$$

где t_m — момент времени начала мониторинга относительного движения; $r = R_1 - R_2 - d_0$, $v = V_1 - V_2$, d_0 — динамически поддерживаемое значение заданной дистанции между ТЕ. Как видно из (1), управление относительным движением возможно путем формирования каждой из сил F_1 или F_2 , при этом один из объектов (в данном случае — ТЕ₁ или ТЕ₂) выполняет ординарное движение, или путем одновременного формирования сил F_1 и F_2 с одинаковыми или отличающимися схемами обратных связей по переменным r и v , текущие значения которых доставляются измерителями. В качестве последних могут выступать как измерители локационного типа (оптические, радио- и акустические), так и навигационные спутниковые системы (НСС), например ГЛОНАСС. Использование НСС представляется наиболее перспективным в силу высокой степени унификации как метода получения навигационной информации, так и технических средств. Пусть ординарное движение выполняет ТЕ₁. Тогда режим заданного движения звена будет поддерживаться движением ТЕ₂ с помощью управляющей силы F_2 , а именно

$$\dot{F}_2 = -\mu_2(F_2 - \varphi_2(V_d) - \gamma_2 v - \beta_2 - T_2), \quad (4)$$

где γ_2 и β_2 — коэффициенты обратной связи. Примем $T_2 = 0$.

Устойчивость относительного движения ($v = 0$, $r = 0$) исследуем путем анализа уравнений первого приближения:

$$\begin{aligned}\delta \dot{r} &= \delta v, \quad \delta r(t_m) = \delta r_0, \\ \delta \dot{v} &= \delta F_2 + S'_2 \delta v, \quad \delta v(t_m) = \delta r_0, \\ \delta \dot{F}_2 &= -\mu_2(\delta F_2 - \gamma_2 \delta V - \beta_2(\delta r)), \quad \delta F_2(0) = \delta F_2,\end{aligned}\quad (5)$$

где $S'_2 = \left. \frac{\partial S_2}{\partial V} \right|_{V=V_d}$.

Полагая $V_d = \text{const} > 0$, запишем характеристическое уравнение для системы (5):

$$a_0 \lambda^3 + a_1 \lambda^2 + a_2 \lambda + a_3 = 0, \quad (6)$$

где $a_0 = 1$, $a_1 = \mu_2 - S'_2$, $a_2 = \mu_2(\gamma_2 - S'_2)$, $a_3 = \mu_2 \beta_2$.

Согласно критерию Рауса—Гурвица, для того чтобы все корни действительного уравнения (6) имели отрицательные действительные части, необходимо и достаточно, чтобы выполнялись неравенства

$$C_0 = a_0 > 0, \quad C_1 = a_1 = \mu_2 - S'_2 > 0,$$

$$\begin{aligned}C_2 &= a_1 a_2 - a_3 a_0 = \mu_2((\mu_2 - S'_2)(\gamma_2 - S'_2) + \beta_2) > 0, \\ C_3 &= \mu_2 \beta_2 C_2 > 0.\end{aligned}\quad (7)$$

По сути, неравенства (7) описывают область значений параметров μ_2 , β_2 и γ_2 , обуславливающих асимптотическую устойчивость управляемого (со стороны ТЕ₂) относительного движения. Перепишем (7) в более явной форме:

$$\mu_2 > S'_2, \quad \beta_2 > 0, \quad \gamma_2 > S'_2 - \frac{\beta_2}{\mu_2 - S'_2}. \quad (8)$$

Из неравенств (8) наиболее интересным для интерпретации является первое, т. е. $\mu_2 > S'_2$, или $\mu_2 > kV_d$, которое выполняется, в чем нетрудно убедиться, для всех видов автотранспорта, за исключением, возможно, ряда легких скоростных моделей.

Поменяем теперь ролями ТЕ₁ и ТЕ₂, т. е. пусть ординарное движение выполняет ТЕ₂, а управление относительным движением осуществляется со стороны впереди идущей ТЕ₁ с помощью силы F_1 :

$$F_1 = -\mu_1(F_1 - \varphi_1(V_d) + \gamma_1 \delta V + \beta_1(r - r_0) - T_1), \quad (9)$$

где полагаем $T_1 = 0$.

Повторяя ранее выполненную процедуру анализа устойчивости относительного движения в новой ситуации, приходим к следующим необходимым и достаточным условиям асимптотической устойчивости: $C_1 = \mu_1 + S'_1 > 0$, $C_2 = \mu_1((\mu_1 + S'_1)(\gamma_1 + S'_1) - \beta_1) > 0$, $C_3 = \mu_1 \beta_1$, $C_2 > 0$, или

$$\begin{aligned}\mu_1 &> -S'_1, \\ \gamma_1 &> -S'_1 + \frac{\beta_1}{\mu_1 + S'_1}, \\ \beta_1 &> 0.\end{aligned}\quad (10)$$

Учитывая, что $S'_1 > 0$ и $\tau_1 > 0$, единственно допустимое определение области значений μ_1 — это $\mu_1 > 0$, из чего, в свою очередь, следует тот факт, что, в отличие (и это существенное отличие) от предыдущей ситуации (с управляющей силой F_2), в рассматриваемой ситуации выбор режима управления (пилотного или автоматического) вполне произведен, так как не зависит от значения выбранной скорости движения звена V_d .

Ранее, при обсуждении ординарного движения ТЕ, было введено понятие его комфорtnости. Транслируя это понятие на относительное движение, поддерживаемое двумя изложенными способами организации обратной связи, потребуем, чтобы все корни соответствующих кубических характеристических уравнений были действительными отрицательными, что эквивалентно требованию обнуления мнимых частей корней в решениях Кардано. Выполняя последнее, приходим к уравнению относительно коэффициента a_3 :

$$a_3^2 + 2 \left(\frac{2a_1^2 - 9a_1 a_2}{27} \right) a_3 + a_2^2 \left(\frac{4a_2 - a_1^2}{108} \right) = 0, \quad (11)$$

которое, по существу, учитывая вид коэффициентов a_i , $i = \overline{1, 3}$, является уравнением связи между параметрами каждой отдельно взятой системы организации относительного движения.

Существенно, что $a_3 > 0$. Необходимость сохранения этого свойства накладывает ограничения на коэффициенты уравнения (11), включая первый, равный 1, а именно: знаки коэффициентов должны чередоваться. Выполняя это условие, получаем систему двух простых неравенств:

$$a_2 > \frac{2a_1}{9}, \quad (12)$$

$$a_2 > \frac{a_1^2}{4}. \quad (13)$$

Сравнивая (12) и (13) между собой, приходим к следующему правилу вывода, с гарантией обуславливающему заявленные выше свойства корней кубичных уравнений.

Правило.

Если $a_1 < 8/9$, то $a_2 > 2a_1/9$;
если $a_1 > 8/9$, то $a_2 > a_1^2/4$. (14)

Обсуждение (14) начнем с неравенств $a_1 < 8/9$ и $a_1 > 8/9$. Если управляющей силой является F_1 , то $a_1 = \mu_1 + S'_1$ и неравенство $a_1 < 8/9$ трансформируется к виду $\mu_1 < 8/9 - S'_1$; учитывая, что S'_1 — величина малая, находим, что $\tau_1 = \mu_1^{-1} > 1,1$ с, т. е. сталкиваемся с ситуацией очень медленной функции $F_1(t)$. Допуская, что для пилота существуют пределы возможностей участия в генерации как быстрых, так и медленных процессов, примем, что при его участии характерное время процесса $F_1(t)$ характеризуется значением $\tau_1 = \tau_p \in \Omega_p = (\tau_p^*, \tau_p^{**})$, где $\tau_p^* = 0,07$ с и $\tau_p^{**} = 1,1$ с. Безусловно, существуют аналогичные ограничения и при автоматическом (беспилотном) управлении, такие что $\tau_1 = \tau_a \in \Omega_a = (\tau_a^*, \tau_a^{**})$. Примем, что $\Omega_p \in \Omega_a$. Таким образом, режим комфортного относительного движения при малых ($V_d < 8/9k$) абсолютных скоростях звена ТЕ может осуществляться только при автоматическом формировании управляющей силы F_1 .

Рассуждая так же, как и выше, о неравенстве $a_1 > 8/9$ или $\mu_1 + S'_1 > 8/9$, можем утверждать, что оно реализуется как в пилотном, так и в беспилотном вариантах управления F_1 для любых значений $V_d > 0$, если $\mu_1 \in \Omega_\mu = (\mu_p^{**}, \mu_p^*)$, где $\mu_p^* = (0,07)^{-4}$ и $\mu_p^{**} = 8/9$.

Пусть теперь имеет место случай, когда управляющей силой, поддерживающей заданное относительное движение, является F_2 . В этом случае, рассматривая неравенства $\mu_2 - S'_2 < \mu_p^{**}$ и $\mu_2 - S'_2 > \mu_p^{**}$, необходимо учитывать еще и условие $\mu_2 - S'_2 > 0$. Тогда нетрудно убедиться, что для $\mu_2 \in \Omega_\mu$ всегда существует $V_d \in \Omega_v = (0, (\mu_p^* - \mu_p^{**})/k)$, так что указанные неравенства могут быть реализованы при пилотном управлении (как, разумеется, и при беспилотном).

Перейдем к раскрытию Правила (14) в частных случаях комфорtnого управления относительным движением двух ТЕ.

- Случай управления силой F_1 .

Правило.

Если $\mu_1 + S'_1 < 8/9$, то $\gamma_1 > -S'_1 + 2(\mu_1 + S'_1)/9\mu_1$;
если $\mu_1 + S'_1 > 8/9$, то $\gamma_1 > -S'_1 + (\mu_1 + S'_1)^2/4\mu_1$. (15)

- Случай управления силой F_2

Правило.

Если $\mu_2 - S'_2 < 8/9$, то $\gamma_2 > S'_2 + 2(\mu_2 - S'_2)/9\mu_2$;
если $\mu_2 - S'_2 > 8/9$, то $\gamma_2 > -S'_2 + (\mu_2 - S'_2)^2/4\mu_2$. (16)

Область значений γ_i и β_i , $i = \overline{1, 2}$, обуславливающих комфорtnое относительное движение, может быть построена, таким образом, путем выбора значений γ_i в соответствии с правилами (15) и (16) с последующим вычислением значений β_i , учитывая, что $a_3 = \mu_\beta$; при этом параметры μ_i и V_d остаются известными. Вместе с тем, вполне закономерен вопрос о том, при всех ли значениях последних существуют решения, обуславливающие заданные динамические свойства системы, включая и сформулированное здесь свойство комфорtnости относительного движения. Ответ на такой вопрос дается теоремой Виета, теперь уже в рамках проблемы синтеза управляющей системы с желаемыми динамическими свойствами.

Пусть эти свойства представлены набором отрицательных характеристических чисел $\Lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ кубического уравнения. Тогда $a_0 = 1$, $a_1 = \sum_{i=1,3} |\lambda_i|$,

$$a_2 = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1,3, i \neq j} |\lambda_i||\lambda_j|, \quad a_3 = |\lambda_1||\lambda_2||\lambda_3|, \text{ и при раздельном управлении силами } F_1 \text{ и } F_2 \text{ имеем соответственно:}$$

$$\mu_1 + k_1 V_d = a_1, \quad \gamma_1 = a_2/\mu_1 - k_1 V_d, \quad \beta_1 = a_3/\mu_1; \quad (17)$$

$$\mu_2 - k_2 V_d = a_1, \quad \gamma_2 = a_2/\mu_2 - k_2 V_d, \quad \beta_2 = a_3/\mu_2. \quad (18)$$

Сравнивая (17) и (18), находим, что симметрия ролевых функций сил F_1 и F_2 , строго говоря, отсутствует, и это хорошо заметно при $\mu_1 = \mu_2$ и $k_1 = k_2$.

Завершая этот раздел статьи, приведем таблицу, в которую включены одиннадцать моделей управ-

Виды моделей управления относительным движением

Функции		№ модели										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
F_1	γ_1	+	-	+	+	-	-	-	+	+	+	-
	β_1	+	-	+	-	+	+	+	+	+	-	+
F_2	γ_2	-	+	+	-	+	-	+	+	-	+	-
	β_2	-	+	+	+	-	-	+	-	+	+	+

лениями относительным движением, способных обеспечить решение задачи его асимптотической устойчивости. Под номерами 1 и 2 в таблицу включены и рассмотренные выше две модели, в которых относительное движение находится под управлением либо TE1, либо TE2; "+" и "-" означают наличие или отсутствие соответствующей обратной связи.

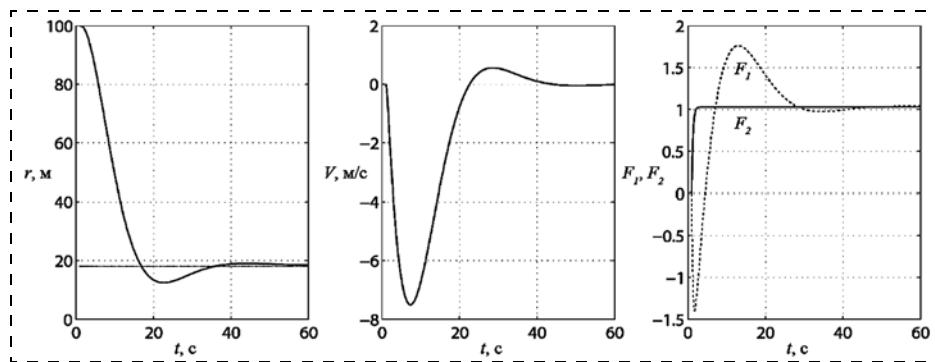


Рис. 1. Результаты эксперимента 1

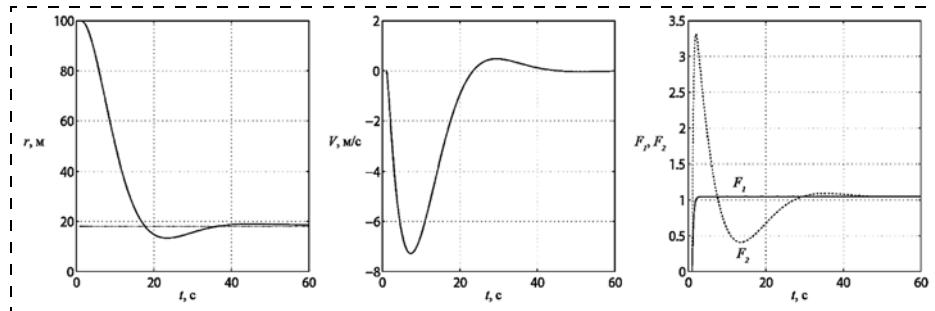


Рис. 2. Результаты эксперимента 2

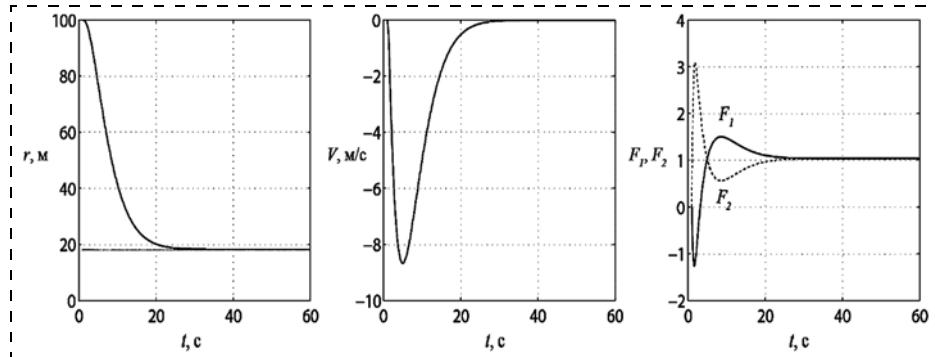


Рис. 3. Результаты эксперимента 3

Численное моделирование движения ТЕ

В численных экспериментах была рассмотрена пара ТЕ:

1) пассажирский автобус ГАЗ 3221 "Газель" 2012 года выпуска со следующими динамическими характеристиками: мощность двигателя — 107 л. с., максимальная скорость $V_{\max} = 36$ м/с (129,6 км/ч), время разгона до 100 км/ч: $t_{0:100} = 30$ с [5], $\mu_1 = 1,487$, фактор обтекаемости $k_1 = 0,0013$;

2) легковой автомобиль Subaru Forester 2014 года выпуска (АКПП, двигатель FA20 с турбонаддувом) со следующими динамическими характеристиками: мощность двигателя — 241 л. с., максимальная скорость $V_{\max} = 61,4$ м/с (221,04 км/ч), время разгона до 100 км/ч: $t_{0:100} = 7,9$ с [6], $\mu_2 = 1,509$, фактор обтекаемости $k_2 = 0,0009$.

Эксперименты проводили с использованием среды моделирования MATLAB. Были проведены три эксперимента — для моделей 1, 2, 3 согласно таблице соответственно.

Начальная дистанция между ТЕ была принята равной 100 м, для движения звена была выбрана скорость V_d , равная 10 м/с, минимальная безопасная дистанция между ТЕ — 18 м. Эксперименты проводили на временном интервале в 60 с. Параметры обратной связи составили: для эксперимента 1 $\gamma_1 = 0,2392$, $\beta_1 = 0,0336$; для эксперимента 2 $\gamma_2 = 0,2395$, $\beta_2 = 0,0331$; для эксперимента 3 $\gamma_1 = 0,2392$, $\beta_1 = 0,0336$, $\gamma_2 = 0,2395$, $\beta_2 = 0,0331$, т. е. те же, что для экспериментов 2 и 1.

Параметры модели подобраны таким образом, что характеристические числа принимают значения $\Lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (-0,5, -0,5, -0,5)$. Таким образом, модели с данными параметрами асимптотически устойчивы. По теореме Виета с использованием выражений (17) и (18) получаем $a_1 = 1,5$, $a_2 = 3/8$, $a_3 = 0,05$ для экспериментов 1 и 2. Условия Раяса — Гурвица (7) принимают вид $C_0 = a_0 = 1 > 0$, $C_1 = a_1 = \mu_2 - S'_1 = 1,5 > 0$, $C_2 = a_1 a_2 - a_3 a_0 = 0,575 > 0$, $C_3 = \mu_2 \beta_2 C_2 = 0,0287 > 0$ и удовлетворяются, как и условия (12), (13).

На рис. 1—3 представлены результаты экспериментов.

Полученные результаты численных экспериментов подтвердили возможность осуществ-

ления различных видов управления, реализующих устойчивое относительное продольное движение звена ТЕ в рамках представленной в данной работе теоретико-механической модели управляемого продольного движения двух ТЕ.

Заключение

Таким образом, в работе представлены модели ординарного и относительного движений, адекватные движению реальных транспортных средств. Выполнено исследование устойчивости движения. Результаты аналитического конструирования моделей подтверждены в численных экспериментах с использованием характеристик реальных транспортных средств. Несмотря на то что статья посвящена преимущественно системам движения транспорта, с очевидностью видна возможность более широкого применения подобных моделей для оп-

ределения возможностей лидера и коллектива в задаче достижения общей цели; примечательна асимметрия таких возможностей.

Работа выполнена при поддержке гранта ДВО РАН № 15-1-4-042 (программа "Дальний Восток").

Список литературы

1. Девятисильный А. С., Дорожко В. М. Исследование задачи автоматического следования за лидером в системе двух транспортных единиц // Известия Академии наук. Теория и системы управления. 2000. № 2. С. 163–169.
2. Тарасик В. П. Теория движения автомобиля. СПб.: БХВ, 2006. 478 с.
3. Демидович Б. П. Лекции по математической теории устойчивости. М.: Наука, 1967. 471 с.
4. Постников М. М. Устойчивые многочлены. М.: Наука, 1981. 176 с.
5. Микроавтобусы ГАЗ-322132 Газель. URL: <http://www.avtogaz.ru/barguzin/gaz-322132> (дата обращения: 30.10.2014)
6. Характеристики Subaru Forester. URL: <http://subaru.ru/models/forester/specifications/> (дата обращения: 30.10.2014).

Models of Terrestrial Transport Motion for a Group of Two Units in Terms of the Leader-Following Problem

A. S. Devyatisilny, devyatis@iacp.dvo.ru, **A. K. Stotsenko**, stotsenko@iacp.dvo.ru,
Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of RAS,
Vladivostok, 690041, Russian Federation

Received on November 13, 2015

The article is devoted to the theoretical mechanical models of the guided longitudinal motion of a couple of transport units. Such models are essential for analysis and construction of complex transportation system models, since the traffic, in which only the adjacent vehicles are interacting, can be presented as a set of transport units' couples. The key target is to create and research the models, suitable for the robot-aided vehicles, considering the difference between the piloted, semi-automated and automated control versions. A new approach is introduced for the coupled transport units' movement, considering velocity, acceleration and the dynamic parameters of the transport units. Absolute motion for a single transport unit model is analyzed, as well as an absolute and relative motion for the coupled transport units' model. Stability for the suggested dynamical system is tested in terms of Lyapunov and Routh-Hurwitz stability criteria. Motion without harmonic oscillations of the state variables is considered as a comfortable motion mode for the model's linear approximation. The ways of maintaining the required mode of the coupled movement for different types of control are considered. Limitations for the piloted control mode are determined. The asymmetry of the control options for the leading and following transport units is detected and studied. Models of an absolute and relative motion, suitable for vehicles, are presented. The results of the numerical experiments, proving the presented analytic models, show possible options for different types of traffic control, which ensure a stable coupled movement of the transport units.

Keywords: motion, velocity, distance, traffic flow, transport unit, control, feedback coupling, model

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 15-1-4-042 (Far East program)

For citation:

Devyatisil'nyj A. S., Stotsenko A. K. Models of Terrestrial Transport Motion for a Group of Two Units in Terms of the Leader-Following Problem, *Ekhtronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 6, pp. 426–431.

DOI: 10.17587/mau.16.426-431

References

1. Devyatisil'nyj A. S., Dorozhko V. M. Issledovanie zadachi avtomaticheskogo sledovaniya za liderom v sisteme dvukh transportnyx edinic (Automated leader-following problem research for the transportation system of two units), *Izvestiya Akademii Nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2000, no. 2, pp. 163–169 (in Russian).

2. Tarasik V. P. Teoriya dvizheniya avtomobilya (Theory of automobile motion), St. Peterburg, BXV, 2006. (in Russian).

3. Demidovich B. P. Lekcii po matematicheskoy teorii ustojchivosti (Lectures on mathematical stability), Moscow, Nauka, 1967 (in Russian).

4. Postnikov M. M. Ustoichivye mnogochleny (Stable polynomials), Moscow, Nauka, 1981. (in Russian).

5. GAZ-322132 Gazel' buses (in Russian). Available at: <http://www.avtogaz.ru/barguzin/gaz-322132> (access date: 30.10.2014).

6. Subaru Forester specifications. (in Russian). Available at: <http://subaru.ru/models/forester/specifications/> (access date: 30.10.2014).

Corresponding author:

Devyatisil'nyj Aleksandr S., D. Sc., Full Professor, Chief Researcher, Head of navigation and control department Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, 690041, Russian Federation, e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

28 сентября - 3 октября 2015 г.
пос. Дивноморское, Геленджикский район, Краснодарский край

**8-Я ВСЕРОССИЙСКАЯ МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ
(МКПУ-2015)**

Председатель Президиума мультиконференции: акад. РАН В.Г. Пешехонов
Состав и направления работы мультиконференции

**Локальная научно-техническая конференция
УПРАВЛЕНИЕ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ,
ЭРГАТИЧЕСКИХ И ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

Председатель: акад. РАН С.В. Васильев

Направления работы конференции

1. Интеллектуальные системы:

- ◆ Автоматизация рассуждений и планирования действий
- ◆ Машинное обучение и методы дооснащения в условиях неопределенности
- ◆ Интеллектуальный анализ данных, распознавание и классификация
- ◆ Компьютерная лингвистика, онтологии, семантический поиск и управление знаниями
- ◆ Когнитивное моделирование и автоматизация целеполагания
- ◆ Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций
- ◆ Мультиагентные системы и распределенный искусственный интеллект
- ◆ Методы и технологии «мягких вычислений»
- ◆ Обучающие и экспертные системы. Верификация знаний
- ◆ Прикладные интеллектуальные системы управления и принятия решений

2. Эргатические информационно-управляющие системы

- ◆ Проблемы автоматизации эргатических систем
- ◆ Интеллектуализация процессов управления и обработки информации в эргатических системах
- ◆ Проблемы человека-машинного интерфейса
- ◆ Обучающие и тренажерные комплексы эргатических систем управления подвижными объектами
- ◆ Опыт создания и внедрения эргатических систем

3. Организационные системы

- ◆ Управление в активных системах
- ◆ Оптимизационные и теоретико-игровые модели и методы управления в организационных системах
- ◆ Информационные технологии в организационном управлении
- ◆ Модели принятия решений в организационных системах
- ◆ Информационное управление. Модели социальных сетей
- ◆ Системы управления проектами и прошограммами

**Локальная научно-техническая конференция
РОБОТОТЕХНИКА И МЕХАТРОНИКА**

Председатель: акад. РАН Ф.Л. Черноуско

Направления работы конференции

- ◆ Кинематика и динамика роботов и мехатронных систем
- ◆ Средства чувствования и навигации роботов и мехатронных систем
- ◆ Алгоритмы и системы управления роботов и мехатронных систем
- ◆ Планирование поведения роботов в недетерминированных средах
- ◆ Групповое взаимодействие роботов
- ◆ Биоподобные роботы и экзоскелеты
- ◆ Медицинские роботы
- ◆ Беспилотные летательные аппараты
- ◆ Безэкипажные наземные машины
- ◆ Морские роботы
- ◆ Роботы для ликвидации чрезвычайных ситуаций
- ◆ Прикладные аспекты проектирования и применение роботов и мехатронных систем различного назначения

**Локальная научно-техническая конференция
УПРАВЛЕНИЕ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
И СЕТЕВЫХ СИСТЕМАХ**

Председатель: чл.-корр РАН И.А. Каляев

Направления работы конференции

- ◆ Модели и стратегии сетевого управления
- ◆ Управление в сетецентрических системах
- ◆ Самоорганизующиеся распределенные системы
- ◆ Управление в облачных средах
- ◆ Мультиагентное взаимодействие в сетях
- ◆ Программно конфигурируемые сети
- ◆ Методы реконфигурации в сетевых управляющих системах
- ◆ Сетевое управление мобильными объектами и устройствами
- ◆ Сетевое управление объектами социальной инфраструктуры («умный город» и «умный дом»)
- ◆ Прикладные задачи управления в сетях

Подробная информация о Мультиконференции размещена на сайте
<http://www.conf.mvs.sfedu.ru>

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Строгинский пер., 4

Телефон редакции журнала: (499) 269-5397, тел./факс: (499) 269-5510

Технический редактор Е. В. Конова. Корректор Т. В. Пчелкина.

Сдано в набор 30.03.2015. Подписано в печать 12.05.2015. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН615. 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 "Адвансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Адвансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.