

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 21

2020

№ 5

Издается с 2000 года ISSN 1684-6427 (Print) ISSN 2619-1253 (Online) DOI 10.17587/issn.1684-6427

Главный редактор:
ФИЛИМОНОВ Н. Б., д.т.н.

Заместители главного редактора:
БОЛЬШАКОВ А. А., д.т.н.
ПОДУРАЕВ Ю. В., д.т.н.
ЮЩЕНКО А. С., д.т.н.

Ответственный секретарь:
БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционный совет:
АНШАКОВ Г. П., чл.-корр. РАН
БОЛОТНИК Н. Н., чл.-корр. РАН
ВАСИЛЬЕВ С. Н., акад. РАН
ЖЕЛТОВ С. Ю., акад. РАН
КАЛЯЕВ И. А., акад. РАН
КУЗНЕЦОВ Н. А., акад. РАН
КУРЖАНСКИЙ А. Б., акад. РАН
МИКРИН Е. А., акад. РАН
ПЕШЕХОНОВ В. Г., акад. РАН
РЕЗЧИКОВ А. Ф., чл.-корр. РАН
СЕБРЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН
СИГОВ А. С., акад. РАН
СОЙФЕР В. А., акад. РАН
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М., чл.-корр. РАН
ФЕДОРОВ И. Б., акад. РАН
ЧЕНЦОВ А. Г., чл.-корр. РАН
ЧЕРНОУСЬКО Ф. Л., акад. РАН
ЩЕРБАТЮК А. Ф., чл.-корр. РАН
ЮСУПОВ Р. М., чл.-корр. РАН

Редколлегия:
DORANTES D. J., PhD, Турция
GROUMPOS P. P., PhD, Греция
ISIDORI A., PhD, Италия
KATALINIC B., PhD, Австрия
LIN CH.-Y., PhD, Тайвань
MASON O. J., PhD, Ирландия
ORTEGA R. S., PhD, Франция
SKIBNIEWSKI M. J., PhD, США
STRZELECKI R. M., PhD, Польша
SUBUDHI V. D., PhD, Индия
АЛИЕВ Т. А., д.т.н., Азербайджан
ГАРАШЕНКО Ф. Г., д.т.н., Украина
ТРОФИМЕНКО Е. Е., д.т.н., Беларусь
БОБЦОВ А. А., д.т.н.
БУКОВ В. Н., д.т.н.
ЕРМОЛОВ И. Л., д.т.н.
ЖУКОВ И. А., д.т.н.
ИЛЬЯСОВ Б. Г., д.т.н.
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф., д.т.н.
ЛЕБЕДЕВ Г. Н., д.т.н.
ЛОХИН В. М., д.т.н.
ПАВЛОВСКИЙ В. Е., д.ф.-м.н.
ПУТОВ В. В., д.т.н.
ПШИХОПОВ В. Х., д.т.н.
РАПОПОРТ Э. Я., д.т.н.
СЕРГЕЕВ С. Ф., д.п.с.н.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д.т.н.
ФРАДКОВ А. Л., д.т.н.
ФУРСОВ В. А., д.т.н.
ЮРЕВИЧ Е. И., д.т.н.

Редакция:
БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Директор издательства:
АНТОНОВ Б. И.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Оморов Р. О.** Метод топологической грубости в задачах исследования и управления синергетическими системами 259
- Имангазиева А. В.** Синхронизация сети нелинейных объектов с запаздыванием по состоянию в условиях неопределенности 266
- Тырва В. О., Саушев А. В.** О реализации совмещаемых управляющих воздействий на объект в системах "человек—машина" 274
- Городецкий В. И., Юсупов Р. М.** Искусственный интеллект: метафора, наука и информационная технология 282

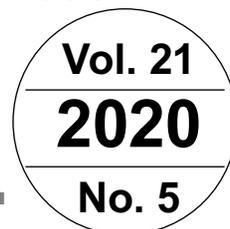
РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Belopukhov V. N., Borovik S. Yu., Podlipnov P. E., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** System for Measuring of Radial Clearances in Gas-Turbine Engine with Self-Compensation of Temperature Effects on the Sensor 295
- Горячева И. Г., Досаев М. З., Селюцкий Ю. Д., Яковенко А. А., Hsiao C.-H., Huang C.-Yu., Ju M.-S., Yeh C.-H.** Управление внедрением индентора в вязкоупругую ткань с использованием пьезоэлектрического привода 304
- Глуценко А. И., Петров В. А., Ласточкин К. А.** Разработка адаптивной системы управления балансирующим роботом на основе второго метода Ляпунова с переменным шагом настройки 312

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования, а также в БД RSCI на платформе Web of Science.

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

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL



MEKHATRONIKA, AVTOMATIZATSIYA, UPRAVLENIE

Published since 2000

ISSN 1684-6427 (Print) ISSN 2619-1253 (Online)

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Editor-in-Chief

FILIMONOV N. B.

Deputy Editors-in-Chief:

BOLSHAKOV A. A.

PODURAEV Yu. V.

YUSCHENKO A. S.

Responsible Secretary:

BEZMENOVA M. Yu.

Editorial Board:

ANSHAKOV G. P.

BOLOTNIK N. N.

CHENTSOV A. G.

CHERNOUSKO F. L.

FEDOROV I. B.

KALYAEV I. A.

KURZHANSKI A. B.

KUZNETSOV N. A.

MIKRIN E. A.

PESHEKHONOV V. G.

REZCHIKOV A. F.

SCHERBATYUK A. F.

SEBRYAKOV G. G.

SIGOV A. S.

SOJFER V. A.

SOLOMENTSEV Yu. M.

VASSILYEV S. N.

YUSUPOV R. M.

ZHELTOV S. Yu.

Editorial Council:

ALIEV T. A., Azerbaijan

DORANTES D. J., PhD, Turkey

GARASCHEV F. G., Ukraine

GROUMPOS P. P., PhD, Greece

ISIDORI A., PhD, Italy

KATALINIC B., PhD, Austria

LIN CH.-Y., PhD, Taiwan

MASON O. J., PhD, Ireland

ORTEGA R. S., PhD, France

SKIBNIEWSKI M. J., PhD, USA

STRZELECKI R. M., PhD, Poland

SUBUDHI B. D., PhD, India

TROFIMENKO Ye. Ye., Belarus

BOBTSOV A. A.

BUKOV V. N.

ERMOLOV I. L.

FILARETOV V. F.

FRADKOV V. L.

FURSOV V. A.

ILYASOV B. G.

KOROSTELEV V. F.

LEBEDEV G. N.

LOKHIN V.M.

PAVLOVSKY V. E.

PUTOV V. V.

PSHIKHOPOV V. Kh.

RAPOPORT E. Ya.

SERGEEV S. F.

YUREVICH E. I.

ZHUKOV I. A.

Editorial Staff:

BEZMENOVA M. Yu.

Director of the Publishing House:

ANTONOV B. I.

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

CONTENTS

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL AND INFORMATION PROCESSING

- Omorov R. O.** Method of Topological Roughness in Tasks of Research and Control of Synergetic Systems 259
- Imangazieva A. V.** Synchronization of a Network of Nonlinear Plants with Time Delay as in Condition Under Uncertainty 266
- Tyrva V. O., Saushev A. V.** About Realizations of Compatible Control Impacts on the Object in the Man—Machine Systems 274
- Gorodetsky V. I., Yusupov R. M.** Artificial Intelligence: Metaphor, Science and Information Technology 282

ROBOT, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

- Belopukhov V. N., Borovik S. Yu., Podlipnov P. E., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** System for Measuring of Radial Clearances in Gas-Turbine Engine with Self-Compensation of Temperature Effects on the Sensor 295
- Goryacheva I. G., Dosaev M. Z., Selyutskiy Yu. D., Yakovenko A. A., Hsiao C.-H., Huang C.-Yu., Ju M.-S., Yeh C.-H.** Control of Insertion of Indenter into Viscoelastic Tissue using a Piezoelectric Drive 304
- Glushchenko A. I., Petrov V. A., Lastochkin K. A.** On Development of Two-Wheeled Balancing Robot Adaptive Control System on Basis of Second Lyapunov Approach with Tunable Step Size 312

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

Р. О. Оморов, д-р техн. наук, проф., член-корр. НАН КР, romano_ip@list.ru,
Институт физики им. акад. Ж. Жеенбаева Национальной академии наук Кыргызской Республики, г. Бишкек

Метод топологической грубости в задачах исследования и управления синергетическими системами

Рассматривается метод исследования грубости динамических систем, основанный на понятии грубости по Андронову—Понтрягину и именуемый "методом топологической грубости". Даны понятия "грубость" и "бифуркация" динамических систем, сформулированные еще на заре становления научного направления математики — топологии — великим французским ученым А. Пуанкаре. Формулируется понятие грубости по Андронову—Понтрягину и определяются условия достижимости требуемой грубости динамической системы. Приведены определения понятий максимальной грубости и минимальной негрубости динамических систем, введенные автором ранее. Сформулированы соответствующие теоремы о необходимых и достаточных условиях достижимости максимальной грубости и минимальной негрубости, а также возникновения бифуркаций топологических структур динамических систем, которые были доказаны в основополагающих работах автора, приведенных в списке литературы. Утверждается, что множества грубых и негрубых систем составляют непрерывные по показателю грубости множества. В качестве показателя грубости в методе используется число обусловленности матрицы приведения к диагональному (квази-диагональному) виду матрицы Якоби в особых точках фазового пространства системы. Метод позволяет управлять грубостью систем управления на основе теоремы, сформулированной с использованием матричного уравнения Сильвестра и доказанной в работах автора, которая также приведена в данной работе. Основные этапы исследований грубости и бифуркаций систем с помощью рассматриваемого метода сформулированы в виде соответствующего алгоритма. В работе кратко изложены вопросы о синергетических системах и хаосе (странных аттракторах) в них. Метод может быть использован для исследований грубости и бифуркаций динамических систем, а также синергетических систем и хаоса различной физической природы. Возможности метода проиллюстрированы на примерах синергетической системы Чуа, а также технической системы в виде нелинейного сервомеханизма.

Ключевые слова: динамическая система, топологическая грубость, синергетическая система и хаос, грубость по Андронову—Понтрягину, бифуркация, максимальная грубость и минимальная негрубость систем, гиперболические и негиперболические особые точки

Введение

Проблемам исследования грубости динамических систем и синтеза грубых (робастных) систем управления уделяется большое внимание в современной теории динамических систем и теории управления [1—3].

В теории динамических систем существуют два различных подхода к проблеме грубости: 1) на основе понятия грубости по Пейксоту, или иначе "структурной устойчивости"; 2) на основе понятия грубости по Андронову—Понтрягину, когда в отличие от предыдущего варианта требуется ε -близость исходного и возмущенного гомеоморфизмов [1, 2, 4].

В работах [5—7] на базе понятия грубости по Андронову—Понтрягину были заложены осно-

вы "метода топологической грубости", который позволяет исследовать грубость (робастность) и бифуркации динамических систем различной природы, в частности синергетических систем, а также синтезировать грубые (робастные) системы управления [8—11].

В данной статье рассматриваются основы "метода топологической грубости", а также применение этого метода к синергетической системе Чуа и нелинейному сервомеханизму [12].

Основы метода

В классической постановке вопросы грубости и бифуркаций систем были поставлены еще на заре становления топологии как нового научного направления математики великим

французским ученым А. Пуанкаре [13]. В частности, термин "бифуркация" впервые введен им и означает дословно "раздвоение" (от решений уравнений динамических систем отходятся новые решения). "Грубость" динамических систем при этом определяется как свойство систем сохранять качественную картину разбиения фазового пространства на траектории при малом возмущении топологий при рассмотрении близких по виду уравнений систем.

В современной терминологии "бифуркация" употребляется как название любого скачкообразного изменения, происходящего при плавном изменении параметров в любой системе. Таким образом, бифуркация означает переход между пространствами грубых систем.

Переход между грубыми системами осуществляется через негрубые области (пространства). Многие основополагающие результаты в теории грубости и бифуркации получены А. А. Андроновым и его школой [1, 2].

В работе [1] впервые дано понятие грубости и сформулированы качественные критерии грубости, впоследствии названной понятием грубости по Андронову—Понтрягину [2].

В многомерной постановке рассматривается динамическая система (ДС) n -го порядка

$$\dot{z} = F(z), \quad (1)$$

где $z \in R^n$ — вектор фазовых координат; F — n -мерная дифференцируемая вектор-функция.

Система (1) называется топологически грубой по Андронову—Понтрягину в некоторой области G , если исходная система и возмущенная система, определенная в подобласти \tilde{G} области G и описываемая уравнением

$$\dot{\tilde{z}} = F(\tilde{z}) + f(\tilde{z}), \quad (2)$$

являются ε -тождественными в топологическом смысле.

Системы (1) и (2) ε -тождественны, если существуют открытые области D , \tilde{D} в n -мерном фазовом пространстве, такие что при $D \subset \tilde{D}$ и $\tilde{G} \subset G \exists \varepsilon, \delta > 0$:

$$\begin{aligned} \text{если } \|f(\tilde{z})\| < \delta \text{ и } |df_i(\tilde{z})/d\tilde{z}_j| < \delta, \quad i, j = \overline{1, n}, \\ \text{то } \|z\| - \|\tilde{z}\| < \varepsilon, \end{aligned}$$

или иными словами

$$(\tilde{D}, (2)) \stackrel{\varepsilon}{\equiv} (D, (1)), \quad (3)$$

иначе, разбиения областей \tilde{D} и D траекториями систем (2) и (1) ε -тождественны (имеют одинаковые топологические структуры с траекториями близкими до ε).

Если (3) не выполняется, то система (1) негруба по Андронову—Понтрягину.

Топологическая структура ДС определяется особыми траекториями и многообразиями типа особых точек (ОТ), особых линий (сепаратрис), замкнутых (периодических) траекторий, притягивающих многообразий (аттракторов).

В работах [5, 6] на основе понятия грубости по Андронову—Понтрягину предложены основы "метода топологической грубости" на базе меры грубости в виде числа обусловленности $C\{M\}$ матрицы M — нормированной матрицы приведения системы к каноническому диагональному (квазидиагональному) виду в ОТ фазового пространства. Здесь же впервые введено понятие максимальной грубости и минимальной негрубости на отношениях пары δ и ε .

Условие достижимости максимальной грубости и минимальной негрубости в окрестности ОТ фазового пространства определяется следующей теоремой, доказанной в работах [5—7].

Теорема 1. *Для того чтобы динамическая система в окрестности гиперболической особой точки (z_0) была максимально грубой, а в окрестности негиперболической — минимально негрубой, необходимо и достаточно, чтобы существовал*

$$M^* = \operatorname{argmin} C\{M\},$$

где M — матрица приведения линейной части A системы (1) в особой точке (z_0) к диагональному (квазидиагональному) базису, $C\{M\}$ — число обусловленности матрицы M .

Замечание 1. Как следует из определений максимальной грубости и минимальной негрубости систем, а также теоремы 1, существуют и минимально грубые, и максимально негрубые системы, для которых $C\{M\} = \infty$. Иначе, множество грубых и негрубых систем образуют непрерывные множества. При этом системами с $C\{M\} = \infty$ будут системы с жордановой квазидиагональной формой матриц линейного приближения A системы (1).

Очевидно, число обусловленности $C\{M\}$ как меру грубости можно использовать для кусочно-гладких ДС, рассматривая совокупную грубость по областям гладкости системы, если ОТ не находятся на границе этих областей.

Следует отметить, что для негладких систем, используя какую-либо обобщенную производную из негладкого анализа при определении матрицы линейной части, можно обобщить эту меру грубости.

Теоретические результаты "метода топологической грубости", полученные в работах [5—11], позволяют управлять грубостью синергетических систем, соответствующая теорема доказана в работах [5, 7].

Рассматривается ДС

$$\dot{z} = Q(z, u), \quad (4)$$

где $z \in R^n$, $u \in R^r$ — соответственно векторы фазовых координат и управлений системы; $Q(\cdot)$ — n -мерная нелинейная дифференцируемая вектор-функция.

Возможности управления грубостью определяются условиями следующей теоремы.

Теорема 2. Для того чтобы в управляемой ДС (4), описываемой в n -мерном фазовом пространстве с помощью матриц линейного приближения A , B соответственно для фазовых координат и управлений существовало управление u , обеспечивающее в окрестности соответствующей ОТ замкнутой системы максимальную грубость или минимальную негрубость, необходимо и достаточно, чтобы выполнялись условия невырожденной разрешимости матричного уравнения Сильвестра.

Управление $u \in U$ ищется в классе систем с обратной связью $u = -Kx$ такое, что матрица замкнутой системы $F = A - BK$ в окрестности ОТ удовлетворяет условиям

$$G(F) = G(\Gamma), \quad M\Gamma - A M = -B H, \quad K = H M^{-1},$$

где $\Gamma \in R^{n \times n}$ — диагональная (квазидиагональная) матрица состояния канонической модели; $H \in R^{m \times n}$ — матрица, задаваемая произвольно с ограничением на наблюдаемость пары (Γ, H) ; $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times m}$ — матрицы координат и управления.

В окрестности ОТ:

$$F(z) = 0, \quad \dot{z} = Az + Bu,$$

управление $u \in U$ синтезируется так, чтобы достичь требуемого значения показателя $C\{M\}$, используя какие-либо методы нелинейного программирования [14].

Метод топологической грубости также позволяет определять бифуркации ДС на основе

критериев, разработанных в работах [5—9]. Более того, метод представляет возможности прогнозирования бифуркаций, а также управления параметрами бифуркаций. В докторской диссертации автора доказана следующая теорема.

Теорема 3. Для того чтобы в области G n -мерной ($n > 2$) ДС при значении параметра $q = q^*$, $q \in R^p$ возникла какая-нибудь бифуркация топологической структуры, необходимо и достаточно чтобы:

- либо 1) в рассматриваемой области G ДС существуют негиперболические (негрубые) ОТ, или орбитально-неустойчивые предельные циклы (ПЦ), для которых имеет место равенство

$$C\{M(q^*)\} = \min \sum_{i=1}^p C_i\{M(q)\}, \quad (5)$$

где p — число ОТ или ПЦ в области G :

- либо 2) в области G ДС имеются какие-либо грубые ОТ или ПЦ, для которых выполняется условие

$$C\{M(q^*)\} = \infty. \quad (6)$$

Замечание 2. Тип бифуркации зависит, во-первых, от того, какое из условий (5) или (6) выполняется, во-вторых, от того, какая особая траектория — ОТ или ПЦ — удовлетворяет этим условиям. Так, например, хаотические колебания ("странные аттракторы"), возникающие из-за потери симметрии, происходят, когда условию (5) удовлетворяют ОТ, а хаотические колебания, возникающие через последовательности бифуркаций удвоения периода, происходят в том случае, когда условию (5) отвечают ПЦ.

Синергетика и хаос

В современной науке возрастает интерес к ее объединяющим направлениям, рассматривающим явления природы и общества, живой и неживой природы с единых точек зрения в зависимости от проявляемых ими свойств и характеристик. К одному из таких направлений науки относится синергетика, которая занимается самоорганизующимися процессами, явлениями и системами [15—17].

Синергетика в настоящее время вторгается во все области науки, начиная с естественных наук — физики, химии, биологии, геологии, геофизики — и заканчивая неточными обла-

стями наук, такими как экономика, социология, психология, философия, распознавание образов, а также в области техники и технологий [8–12, 15–20].

Многие ученые в настоящее время ставят задачи не только исследования синергетических процессов и систем, но и управления ими в целях достижения желаемого развития и динамики [21, 22].

Одним из явлений в синергетических системах, привлекающих огромное внимание исследователей в различных областях науки, являются так называемые странные аттракторы, представляющие притягивающие многообразия в фазовом пространстве с хаотическим поведением (хаосом) траекторий в этих многообразиях [15–24]. Исследование странных аттракторов вызывает интерес и потому, что многие видят в изучении этого феномена ключ к разгадке тайн природы турбулентности и хаоса в системах различной природы — физических и химических, экономических и социальных системах [23, 24]. Более того, актуальной становится и задача управления хаосом в синергетических системах различной физической природы [21].

Основоположниками синергетики по праву являются выдающиеся ученые — бельгийский химик и физик, Нобелевский лауреат Илья Пригожин и немецкий физик Герман Хакен. Огромный вклад в синергетику внесли многие советские и российские ученые, в особенности школа С. П. Курдюмова [25].

При исследовании и управлении синергетическими системами важнейшее значение имеют вопросы грубости и бифуркаций. Одним из методов в изучении свойств грубости и бифуркаций синергетических систем, а также управления этими свойствами служит "метод топологической грубости", основы которого изложены выше.

Далее в работе возможности метода проиллюстрированы на двух примерах систем — Чуа и нелинейного сервомеханизма [26].

Примеры

Система (цепь) Чуа [21]. Как известно, система Чуа представляет собой электронную цепь с одним нелинейным элементом, которая способна генерировать разнообразные, в частности, хаотические колебания.

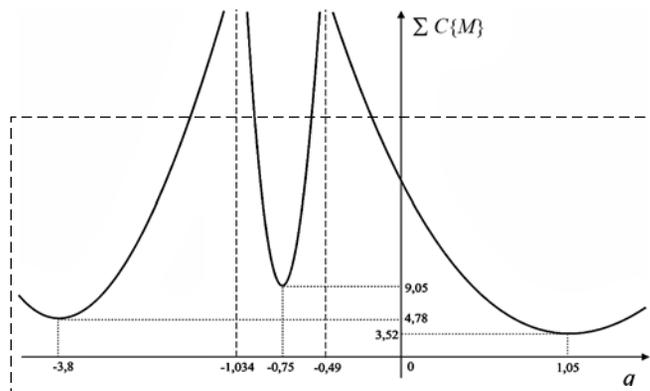


Рис. 1. Зависимость $C\{M\}$ от параметра q в системе Чуа
Fig. 1. Dependency of $C\{M\}$ on the q parameter in the Chua system

Система Чуа описывается уравнениями:

$$\dot{x} = p(y - f(x)), \quad \dot{y} = x - y + z, \quad \dot{z} = -qy, \quad (7)$$

где $f(x) = M_1x + 0,5(M_1 - M_0)(|x + 1| - |x - 1|)$.

При $p = 9$, $q = 14,3$, $M_1 = -6/7$, $M_0 = 5/7$, в системе (7) наблюдаются хаотические колебания. В данном случае имеются три ОТ: $OT_1(0, 0, 0)$; $OT_{2,3}(\pm 11/6, 0, 11/6)$.

Исследованиями установлены, что хаотические движения обнаруживаются и при значениях q : $-1,034 < q < -0,49$, а при $q = -3,8$ и $q = 1,05$ наблюдается максимальная грубость движений в системе (7), что показано на рис. 1.

Нелинейный сервомеханизм [26]. Рассматривается нелинейная кусочно-гладкая система в виде нелинейного сервомеханизма, заданная уравнениями

$$\ddot{x} + \dot{x} + \gamma x = -F(\sigma), \quad \sigma = x + T_1\dot{x}, \quad (8)$$

где $\gamma = \gamma_h R / T_s^2$, $T_1 = T_s / \gamma R$ — постоянные коэффициенты, $F(\sigma)$ — обобщенная релейная функция, обусловленная зоной нечувствительности и гистерезисом (рис. 2); σ — аргумент релейной функции.

В работе [26] проведено исследование системы (8) при различных случаях первичных параметров T_s , γ_h методом многолистной фазовой плоскости и точечных преобразований.

Представим систему (8) в фазовой плоскости $(x, y = \dot{x})$:

$$\dot{x} = y, \quad \dot{y} = -\gamma x - y - F(\sigma), \quad \sigma = x + T_1 y. \quad (9)$$

В данной системе только одна ОТ — $(0, 0)$: $y = 0$, $-\gamma x - F(\sigma) = 0$, т. е. $x_0 = 0$, $y_0 = 0$.

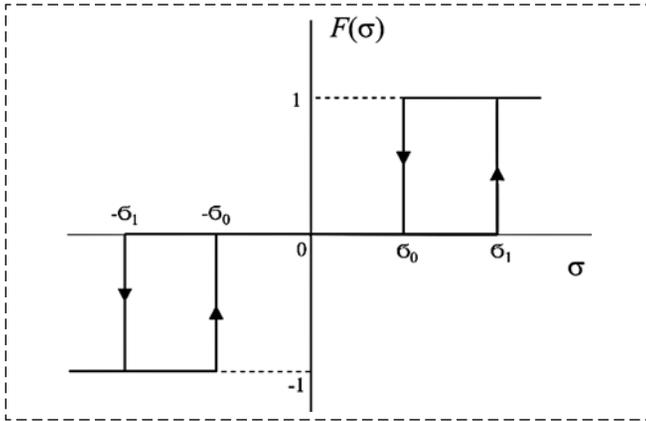


Рис. 2. Обобщенная релейная функция $F(\sigma)$
 Fig. 2. Generalized relay function $F(\sigma)$

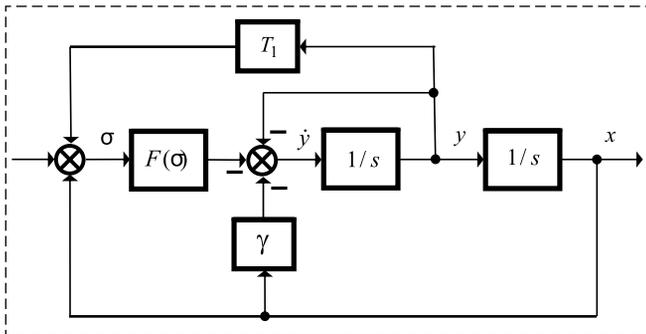


Рис. 3. Структурная схема системы (9)
 Fig. 3. Structural diagram of the system (9)

В пространстве состояний (фазовых координат) система (9) представляется структурой, показанной на рис. 3.

Матрица линейной части:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\gamma & -1 \end{bmatrix}.$$

Собственные значения:

$$\lambda_{1,2} = -1/2 \pm \sqrt{1 - 4\gamma}/2.$$

Тип особой точки ОТ — (0,0) — определяется величиной γ . Если корни действительные, т. е. $1 - 4\gamma \geq 0$, $\gamma \leq 1/4$, то имеем

$$C\{M\} = \frac{\sqrt{\frac{1+(1+\gamma)}{\sqrt{1+(\gamma-1)^2}}}}{\sqrt{\frac{1-(1+\gamma)}{\sqrt{1+(\gamma-1)^2}}}}.$$

Отсюда $\min C\{M\}$ будем иметь при $\gamma \rightarrow 0$, а именно $C\{M\} \rightarrow 2,4$ (система стремится к максимальной грубости), а $\max C\{M\} = \infty$ будет при

$\gamma = 1/4$, при этом система стремится к минимальной грубости или, иначе, переходит к негрубой области (неработоспособна). Если корни комплексные, т. е. $\gamma > 1/4$, то $\min C\{M\} = 1,6$ будет достигнут при $\gamma = 1,5$, и система будет максимально грубой. Максимальное значение $C\{M\} \rightarrow \infty$ при $\gamma \rightarrow \infty$ (система стремится к неработоспособному негрубому состоянию).

Заключение

Рассмотренный в данной статье "метод топологической грубости" является методом количественного исследования грубости и бифуркаций ДС самого широкого класса и различной физической природы.

Возможности метода для исследований грубости и бифуркаций систем показаны на примерах только некоторых синергетических и технических систем, хотя, конечно же, метод был и может быть использован для исследований большого числа систем — как синергетических систем различной природы (Лоренца, Ресслера, Чуа и др.), так и ДС более широкого класса, в частности, при исследовании колебательных систем и бифуркаций Хопфа, аттрактора отображения Хенона [8—12, 15—17].

Таким образом, алгоритм исследований грубости и бифуркаций ДС методом топологической грубости по ОТ фазового пространства следующий:

1. Исследуемая система представляется в виде (1).
2. Определяются ОТ_i системы (1) $F(z(t)) = 0$.
3. Находятся матрицы Якоби A_i (линейного приближения) в ОТ_i.
4. Вычисляются матрицы M_i приведения A_i к диагональному (квазидиагональному) виду.
5. Вычисляются числа обусловленности $C\{M_i\}$, которые в совокупности и определяют грубость системы по каким-либо варьируемым параметрам.
6. При значениях варьируемых параметров, удовлетворяющих условиям (5) или (6), возникают возможные бифуркации в исследуемой системе (1).

Список литературы

1. Андронов А. А., Понтрягин Л. С. Грубые системы // Докл. АН СССР. 1937. Т. 14, № 5. С. 247—250.
2. Аносов Д. В. Грубые системы // Топология, обыкновенные дифференциальные уравнения, динамические си-

стемы: Сборник обзорных статей. 2. К 50-летию института (Труды МИАН СССР. Т. 169). М.: Наука, 1985. С. 59–93.

3. Поляк Б. Т., Цыпкин Я. З. Робастная устойчивость линейных систем // Итоги науки и техники. Сер. Техническая кибернетика. Т. 32. М.: ВИНТИ, 1991. С. 3–31.

4. Peixoto M. M. On structural stability // Ann. Math. 1959. Vol. 69, N. 1. P. 199–222.

5. Оморов Р. О. Максимальная грубость динамических систем // Автоматика и Телемеханика. 1991. № 8. С. 36–45.

6. Omorov R. O. Maximal coarseness of dynamical systems // Automation and Remote Control. 1992. Vol. 52, N. 8 pt. 1. P. 1061–1068.

7. Оморов Р. О. Количественные меры грубости динамических систем и их приложения к системам управления: Дис. докт. техн. наук. СПб.: Санкт-Петербургский институт точной механики и оптики, 1992.

8. Оморов Р. О. Метод топологической грубости: Теория и приложения. I. Теория // Изв. НАН КР, 2009. № 3. С. 144–148.

9. Оморов Р. О. Синергетические системы: Проблемы грубости, бифуркаций и катастроф // Наука и новые технологии. 1997. № 2. С. 26–36.

10. Оморов Р. О. Топологическая грубость синергетических систем // Проблемы управления и информатики. 2012. № 2. С. 5–12.

11. Omorov R. O. Topological Roughness of Synergetic Systems // Journal of Automation and Information Sciences. 2012. Vol. 44. P. 61–70.

12. Оморов Р. О. Теория топологической грубости систем. Бишкек: Илим, 2019.

13. Пуанкаре А. О кривых определяемых дифференциальными уравнениями / Пер. с франц., под ред. А. А. Андронова. М., Л.: Гостехиздат, 1947.

14. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование / Пер. с англ. М.: Мир, 1975.

15. Хакен Г. Синергетика: иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах / Пер. с англ. М.: Мир, 1985.

16. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного: Введение / Пер. с англ. М.: Мир, 1990.

17. Haken H. Synergetics: Introduction and Advanced Topics. London: Springer, 2004.

18. Пенроуз Р. Новый ум короля: О компьютерах, мышлении и законах физики / Пер. с англ. М.: ЛКИ, 2008.

19. Занг В. Б. Синергетическая экономика. Время и переменны в нелинейной экономической теории / Пер. с англ. М.: Мир, 1999.

20. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика: От тепловых двигателей до диссипативных структур / Пер. с англ. М.: Мир, 2002.

21. Андриевский Б. Р., Фрадков А. Л. Управление хаосом: методы и приложения. I. Методы // А и Т. 2003. № 5. С. 3–45.

22. Колесников А. А. Синергетические методы управления сложными системами: Теория системного синтеза. 2-е изд. М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2012.

23. Странные аттракторы / Сб. пер. с англ. под ред. Я. Г. Синая, Л. П. Шильникова. М.: Мир, 1981.

24. Peak D., Frame M. Chaos Under Control: The Art and Science of Complexity. New York: W. H. Freeman and Company, 1994.

25. Капица С. П., Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г. Синергетика и прогнозы будущего. 2-е изд. М.: Эдиториал УРСС, 2001.

26. Петров В. В., Гордеев А. А. Нелинейные сервомеханизмы. М.: Машиностроение, 1979.

Method of Topological Roughness in Tasks of Research and Control of Synergetic Systems

R. O. Omorov, romano_ip@list.ru,

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

Corresponding author: Omorov R. O., Chief Research Officer,
Institute of Physics of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic,
Bishkek, 720071, Kyrgyz Republic, e-mail: romano_ip@list.ru

Accepted on January 20, 2020

Abstract

The method of a research of roughness of dynamic systems based on a concept of roughness according to Andronov—Pontryagin and named with "method of topological roughness" is considered. The concepts "roughness" and "bifurcation" of dynamic systems formulated at a dawn of formation of the scientific direction of mathematics — topology, are given by the great French scientist A. Poincare. Also the concept of roughness according to Andronov—Pontryagin is formulated and conditions of accessibility of required roughness of a dynamic system are defined. The definitions of concepts of the maximum roughness and minimum non roughness of dynamic systems entered by the author earlier are given. The corresponding theorems of necessary and sufficient conditions of accessibility of the maximum roughness and the minimum non roughness and also emergence of bifurcations of topological structures of dynamic systems, which were proved in the fundamental works of the author given in the list of references are formulated. At the same time it is claimed that sets of rough and not rough systems make roughnesses of a set, continuous on an indicator. As a roughness indicator in a method the number of conditionality of a matrix of reduction to a diagonal (quasidiagonal) type of a matrix of Jacobi in special points of phase space of a system is used. The method allows to controlling roughness of control systems on the basis of the theorem formulated with use of the matrix equation of Sylvester and proved in works of the author which is also provided in this work. The main stages of researches of roughness and bifurcations of systems by means of the considered method are formulated in the form of the corresponding algorithm. In work questions of synergetic systems and chaos (strange attractors) in them, founders of science of synergetics — H. Haken, I. Prigozhin are briefly stated. The method can be used for researches of roughness and bifurcations of dynamic systems and also synergetic systems and chaos of the different physical nature. In works of the author the method is approved on examples of many synergetic systems, such as Lorenz

attractors and Rössler, Belousov-Zhabotinsky's systems, Chua, "predator-prey", Henon, Hopf's bifurcations, etc. In this work of a possibility of a method are illustrated on examples of synergetic system Chua and also a technical system in the form of the nonlinear servomechanism.

Keywords: a dynamic system, topological roughness, a synergetic system and chaos, roughness according to Andronov—Pontryagin, bifurcation, the maximum roughness and the minimum non roughness of systems, hyperbolic and not hyperbolic special points

For citation:

Omorov R. O. Method of Topological Roughness in Tasks of Research and Control of Synergetic Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 5, pp. 259—265.

DOI: 10.17587/mau.21.259-265

References

1. **Andronov A. A., Pontrjagin L. S.** Grubye sistemy (Rough systems), *Dokl. AN SSSR*, 1937, vol. 14, no. 5, pp. 247—250 (in Russian).
2. **Anosov D. V.** Rough systems. Topology, ordinary differential equations, dynamic systems: Collection of review articles. 2. To the 50 anniversary of institute, *Proceedings of MIAS SU*, vol. 169, Moscow, Nauka, 1985, pp. 59—93 (in Russian).
3. **Polyak B. T., Tsyarkin Ya. Z.** Robust stability of linear systems. Results of science and technology, iss. *Technical Cybernetics*, vol. 32, Moscow, VINITI, 1991, pp. 3—31 (in Russian).
4. **Peixoto M. M.** On structural stability, *Ann. Math.*, 1959, vol. 69, no 1, pp. 199—222.
5. **Omorov R. O.** Maximum roughness of dynamic systems, *Avtomatika i Telemekhanika*, 1991, no 8, pp. 36—45 (in Russian).
6. **Omorov R. O.** Maximal coarseness of dynamical systems, *Automation and Remote Control*, 1992, vol. 52, no. 8, pt. 1, pp. 1061—1068.
7. **Omorov R. O.** Quantitative measures of roughness of dynamic systems and their application to control systems: Diss. Doctor of Engineering Sciences, Saint Petersburg, Sankt-Peterburgskij institut tochnoj mehaniki i optiki, 1992.
8. **Omorov R. O.** Topological roughness method: Theory and applications. I. Theory, *Izv. NAN KR*, 2009, no. 3, pp. 144—148 (in Russian).
9. **Omorov R. O.** Synergetic systems: Problems of roughness, bifurcations and catastrophs, *Nauka i Novye Tehnologii*, 1997, no 2, pp. 26—36 (in Russian).
10. **Omorov R. O.** Topological roughness of synergetic systems, *Problemy Upravlenija i Informatiki*, 2012, no 2, pp. 5—12 (in Russian).
11. **Omorov R. O.** Topological Roughness of Synergetic Systems, *Journal of Automation and Information Sciences*, 2012, vol. 44, pp. 61—70.
12. **Omorov R. O.** Theory of topological roughness of systems, Bishkek, Ilim, 2019 (in Russian).
13. **Puankare A.** About curves defined by differential equations, Moscow—Leningrad, Gostehizdat, 1947 (in Russian).
14. **Himmel'blau D.** Application nonlinear programming, Moscow, Mir, 1975 (in Russian).
15. **Haken H.** Synergetics: instability hierarchies in self-organizing systems and devices, Moscow, Mir, 1985 (in Russian).
16. **Nikolis G., Prigozhin I.** Exploring Complexity: An Introduction, Moscow, Mir, 1990 (in Russian).
17. **Haken H.** Synergetics: Introduction and Advanced Topics, London, Springer, 2004.
18. **Penrose R.** The Emperor's New Mind: On Computers, Minds and The Laws of Physics, Moscow, LKI, 2008 (in Russian).
19. **Zang V. B.** Synergetic economy. Time and change in nonlinear economic theory, Moscow, Mir, 1999 (in Russian).
20. **Prigozhin I., Kondepudi D.** Modern thermodynamics: From heat engines to dissipative structures, Moscow, Mir, 2002 (in Russian).
20. **Andrievskii B. R., Fradkov A. L.** Control of chaos: methods and applications. I. Methods, *Avtomatika i Telemekhanika*, 2003, no. 5, pp. 3—45 (in Russian).
22. **Kolesnikov A. A.** Synergetic Management Methods for Complex Systems: Theory of System Synthesis, Moscow, Knizhnyj dom "LIBROKOM", 2012 (in Russian).
23. **Sinai Ya. G., Shilnikov L. P.** ed. Strange attractors, Moscow, Mir, 1981 (in Russian).
24. **Peak D., Frame M.** Chaos Under Control: The Art and Science of Complexity, New York, W. H. Freeman and Company, 1994.
25. **Kapitsa S. P., Kurdyumov S. P., Malinetskii G. G.** Synergetics and forecasts of the future, Moscow, Jeditorial URSS, 2001 (in Russian).
26. **Petrov V. V., Gordeev A. A.** Nonlinear servomechanisms, Moscow, Mashinostroenie, 1979 (in Russian).

А. В. Имангазиева, канд. техн. наук, доц.,
доцент кафедры "Высшая и прикладная математика", aliya111@yandex.ru,
Астраханский государственный технический университет

Синхронизация сети нелинейных объектов с запаздыванием по состоянию в условиях неопределенности¹

Предложены робастные алгоритмы синхронизации сети нелинейных объектов с запаздыванием по состоянию. Рассматривается сеть объектов управления, динамические процессы в которых описываются дифференциальными уравнениями в форме Лурье с липшицевыми нелинейностями, с учетом запаздывания по состоянию в условиях постоянно действующих внешних неконтролируемых возмущений. Учет нелинейных и запаздывающих составляющих в математических моделях объектов делает систему близкой к реальной. В каждом локальном объекте сети осуществляется слежение за выходом ведущей подсистемы. Динамическая компенсация возмущений в каждом из объектов осуществляется путем выделения сигнала, несущего информацию об этих возмущениях, а затем подавления его с помощью вспомогательного контура и двух наблюдателей переменных системы. Применение наблюдателей переменных обусловлено необходимостью получения оценок производных переменных системы, измерение которых недоступно. Таким образом выбранные структуры управлений в каждом из локальных объектов не только обеспечивают достижимость цели управления с требуемой точностью, но и позволяют за счет использования наблюдателей переменных системы существенно понизить порядок системы. Рассмотрен числовой пример синхронизации сети, состоящей из четырех нелинейных объектов управления с запаздыванием по состоянию в условиях неопределенности параметров их математических моделей и действия внешних ограниченных возмущений. Для сети объектов применены предложенные алгоритмы управления. Проведено численное моделирование в пакете Simulink MATLAB, приведены графики переходных процессов по ошибкам слежения для каждой из четырех подсистем. Результаты моделирования подтвердили теоретические выводы и показали хорошую работоспособность предложенных алгоритмов синхронизации в условиях постоянно действующих внешних и внутренних возмущений.

Ключевые слова: сеть, робастное управление, липшицевы нелинейности, ограниченные возмущения, точность, запаздывание по состоянию, алгоритм управления, наблюдатель, вспомогательный контур

Введение

Бурное развитие новых высокотехнологичных сетей в промышленности и производстве, электроэнергетике, а также транспортных сетей и т. д. требует эффективных решений задач управления сетями объектов в условиях априорной неопределенности и при действии на них внешних неконтролируемых возмущений. Краткий обзор областей применения систем управления сетями объектов представлен в работе [1]. В последние десятилетия исследователями по теории управления написано большое число работ по управлению сетями различных объектов. К числу обзорных работ по сетевому управлению относятся работы [2–5].

В большинстве исследований математические модели объектов управления содержат разного рода неточности, которые необходимо учитывать на этапе синтеза алгоритмов управления. Так, ограничения, связанные с наличием запаздывания в условиях постоянно действующих внешних возмущений,

ухудшают динамические свойства замкнутой системы управления. Запаздывание может быть вызвано самыми различными причинами: инерционностью некоторых элементов, ограниченностью скорости распространения сигнала, растянутостью изучаемого процесса во времени, временной задержкой и т. д. Как правило, динамические процессы в подобных системах описываются уравнениями с последствием. Предложены решения задач управления объектами с учетом различных видов запаздывания [6–11]. Так, например, с помощью H_∞ -теории предложено решение задачи синхронизации для объекта с дискретным и распределенным запаздыванием [6]. В монографии [7] с помощью метода вспомогательного контура [8] предложены решения задач робастного управления для различных объектов с последствием. Алгоритм управления линейными объектами с запаздывающим входным сигналом при наличии внешних возмущений предложен в статье [9]. В работе [10] синтезируется наблюдатель для нелинейного объекта с запаздыванием. В статьях 18-го конгресса IFAC, полностью посвященного управлению объектами с запаздыванием, представ-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00610.

лены результаты по этой проблеме, некоторые из которых изложены в работе [11].

В настоящей статье предлагается решение одной из задач сетевого управления, задачи робастной синхронизации сети нелинейных объектов с запаздыванием по состоянию. Предлагается решение поставленной задачи с использованием метода вспомогательного контура [8]. Динамическая компенсация возмущений в каждом из синхронизируемых объектов осуществляется с помощью выбранного специальным образом вспомогательного контура и наблюдателей переменных системы. Данная работа является развитием результата, полученного в работе [12]. Одним из главных достоинств алгоритма является то, что для его реализации не требуется измерения производных регулируемой переменной, а управляющее воздействие формируется на основании измеренного входа и выхода, а также переменных, получаемых с двух наблюдателей Халила [13].

2. Постановка задачи

Рассмотрим сеть r объектов управления, динамические процессы в которых описываются уравнениями

$$Q_l(D)y_l(t) = k_l R_l(D)u_l(t) + N_l(D)y_l(t - h_l(t)) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q D^{n-i} \psi_{ijl}(y_l(t))\tau_{jl} + f_l(t); \quad (1)$$

$$D^i y_l(0) = y_{il}, \quad i = 0, \dots, n-1, \quad l = \overline{1, r}.$$

где $y_l(t)$, $u_l(t)$ — скалярные регулируемые переменные и управляющие воздействия локальных объектов; $D = d/dt$ — оператор дифференцирования; $Q_l(D)$, $R_l(D)$ — нормированные дифференциальные операторы; $\deg Q_l(D) = n_l$, $\deg R_l(D) = m_l$, $\deg N_l(D) \leq n_l - 1$; время запаздывания $h_l(t)$ — ограниченные функции; $k_l > 0$, $\psi_{ijl}(y_l(t))$ — гладкие функции, удовлетворяющие условию Липшица; τ_{jl} — неизвестные постоянные ($i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, q}$); $f_l(t)$ — внешние возмущающие воздействия, $l = \overline{1, r}$.

Ведущая подсистема описывается уравнением

$$Q_m(D)y_m(t) = k_m g(t), \quad (2)$$

где $g(t)$ — скалярное ограниченное задающее воздействие; $k_m > 0$, $y_m(t)$ — ограниченный скалярный выход, $\deg Q_m(D) = n_l - m_l$.

Требуется получить алгоритмы синхронизации, обеспечивающие выполнение следующих целевых условий:

$$|y_l(t) - y_m(t)| < \delta \quad \text{при } t \leq T, \quad (3)$$

где δ — некоторое достаточно малое число, $T > 0$.

Предположения:

1. Локальные подсистемы являются управляемыми.

2. Коэффициенты операторов $Q_l(D)$, $R_l(D)$, $N_l(D)$, $M_l(D)$ и величины k_l зависят от вектора неизвестных параметров $\xi \in \Xi$, где Ξ — известное множество возможных значений вектора ξ .

3. Время запаздывания $h_l(t)$ — ограниченные функции, удовлетворяющие условиям $\frac{dh_l(t)}{dt} < 1$, $h_l(t) > 0$, $l = \overline{1, r}$.

4. Задающее воздействие $g(t)$ и возмущающие воздействия $f_l(t)$, $l = \overline{1, r}$, локальных объектов являются ограниченными функциями времени.

5. Полиномы $R_l(\lambda)$, $Q_m(\lambda)$, $R_m(\lambda)$ — гурвицевы, где λ — комплексная переменная в преобразовании Лапласа; $\deg R_l(D) = m_l$, $\deg Q_l(D) = n_l$, $\deg Q_m(D) = n_l - m_l$.

6. Производные выходных переменных и управляющих воздействий не измеряются.

3. Решение задачи

Представим операторы $Q_l(D)$ и $R_l(D)$ в виде $Q_l(D) = Q_{0l}(D) + \Delta Q_l(D)$, $R_l(D) = R_{0l}(D) + \Delta R_l(D)$, где $Q_{0l}(D)$, $R_{0l}(D)$ — операторы с известными коэффициентами, такие что полиномы $Q_{0l}(\lambda)$, $R_{0l}(\lambda)$ — гурвицевы и имеют порядки n_l и m_l соответственно. Так как $Q_{0l}(\lambda)$ и $R_{0l}(\lambda)$ — произвольные известные полиномы, то выберем их так, чтобы выполнялось равенство $Q_{ml}(D) = Q_{0l}(D)/R_{0l}(D)$.

Воспользуемся известной параметризацией [14]. Тогда уравнение (1) преобразуется в эквивалентное уравнение относительно выхода $y_l(t)$:

$$Q_{ml}(D)y(t) = k_l(u_l(t) + \frac{\Delta R_l(D)}{R_{0l}(D)}u_l(t) - \frac{\Delta Q_l(D)}{k R_{0l}(D)}y_l(t) + \frac{N_l(D)}{k_l R_{0l}(D)}y_l(t - h_l(t)) + \frac{1}{k_l R_{0l}(D)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q D^{n-i} \psi_{ijl}(y_l(t))\tau_{jl} + \frac{1}{k_l R_{0l}(D)} f_l(t)). \quad (4)$$

Составим уравнение относительно ошибки $e_l(t) = y_l(t) - y_m(t)$, вычитая уравнение (2) из соотношения (4):

$$\begin{aligned}
Q_{ml}(D)e_l(t) = & k_l(u_l(t) + \frac{\Delta R_l(D)}{R_{0l}(D)}u_l(t) - \\
& - \frac{\Delta Q_l(D)}{k_l R_{0l}(D)}y_l(t) + \frac{N_l(D)}{k_l R_{0l}(D)}y_l(t - h_l(t)) + \\
& + \frac{1}{k_l R_{0l}(D)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q D^{n-i} \psi_{ij}(y_l(t)) \tau_{jl} + \\
& + \frac{1}{k_l R_{0l}(D)} f_l(t) - \frac{k_{ml} g_l(t)}{k_l R_{0l}(D)}. \quad (5)
\end{aligned}$$

Сформируем управление, которое позволит компенсировать негативное действие возмущений в l -й подсистеме. В случае доступности измерения $n_l - m_l - 1$ производных управляющего воздействия $v_l(t)$ зададим закон управления $u_l(t)$ в виде

$$u_l(t) = T_l(D)v_l(t), \quad l = \overline{1, r}. \quad (6)$$

Тогда уравнение (5) примет следующий вид:

$$\begin{aligned}
Q_{ml}(D)e_l(t) = & k_l T_l(D) \left(v_l(t) + \frac{\Delta R_l(D)}{R_{0l}(D)} v_l(t) - \right. \\
& - \frac{\Delta Q_l(D)}{k_l R_{0l}(D) T_l(D)} y_l(t) + \frac{N_l(D)}{k_l R_{0l}(D) T_l(D)} y_l(t - h_l(t)) + \\
& + \frac{1}{k_l R_{0l}(D) T_l(D)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q D^{n-i} \psi_{ij}(y_l(t)) \tau_{jl} + \\
& \left. + \frac{1}{k_l R_{0l}(D) T_l(D)} f_l(t) - \frac{k_{ml} g_l(t)}{k_l R_{0l}(D) T_l(D)} \right), \quad l = \overline{1, r}. \quad (7)
\end{aligned}$$

Так как система проектируется в предположении, что доступны измерению только скалярные вход и выход, то закон управления зададим вместо уравнения (6) в виде

$$u_l(t) = T_l(D)\bar{v}_l(t), \quad l = \overline{1, r}, \quad (8)$$

где $\bar{v}_l(t)$ — оценка сигнала, получаемая с наблюдателя [13]

$$\begin{aligned}
\dot{\zeta}_l = & F_{0l} \zeta_l(t) + B_{0l}(v_l(t) - \bar{v}_l(t)), \\
\bar{v}_l(t) = & L_l \zeta_l(t), \quad l = \overline{1, r}. \quad (9)
\end{aligned}$$

Здесь $\zeta_l(t) \in R^{n_l - m_l}$; F_{0l} — матрица в форме Фробениуса с нулевой нижней строкой; $L_l = [1, 0, \dots, 0]$; $B_{0l}^T = \begin{bmatrix} b_{1l} & & b_{n_l - m_l} \\ \mu & & \mu^{n_l - m_l} \end{bmatrix}$. Параметры $b_1, \dots, b_{n_l - m_l}$ выбираются так, чтобы матрицы $F_l = F_{0l} + B_l L$ были гурвицевыми, $B_l^T = [b_{1l}, \dots, b_{n_l - m_l}]$.

Подставив выражение (8) в уравнение (7), получим уравнение

$$\begin{aligned}
Q_{ml}(D)e_l(t) = & \beta_l T_l(D) R_{0l}(D) v_l(t) + \bar{\varphi}_l(t) + \\
& + \beta_l T_l(D) R_{0l}(D) (v_l(t) - \bar{v}_l(t)), \quad (10)
\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
\bar{\varphi}_l(t) = & (k_l - \beta_l) v_l(t) + k_l \frac{\Delta R_l(D)}{R_{0l}(D)} v_l(t) - \\
& - \frac{\Delta Q_l(D)}{R_{0l}(D) T_l(D)} y_l(t) + \frac{N_l(D)}{R_{0l}(D) T_l(D)} y_l(t - h_l(t)) + \\
& + \frac{1}{R_{0l}(D) T_l(D)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q D^{n-i} \psi_{ij}(y_l(t)) \tau_{jl} + \\
& + \frac{M_l(D)}{R_{0l}(D) T_l(D)} f_l(t) - \frac{k_{ml}}{R_{0l}(D) T_l(D)} g_l(t).
\end{aligned}$$

Выберем в l -й локальном объекте полином $T_l(\lambda)$ так, чтобы передаточная функция удовлетворяла равенству $\frac{T_l(\lambda)}{Q_m(\lambda)} = \frac{1}{\lambda + a_{ml}}$. Тогда уравнение (10) преобразуется к виду

$$(D + a_{ml})e_l(t) = \beta_l v_l(t) + \varphi_l(t), \quad (11)$$

где

$$\varphi_l(t) = \frac{1}{T_l(D)} \bar{\varphi}_l(t) + \beta_l (\bar{v}_l(t) - v_l(t)), \quad l = \overline{1, r}.$$

В сигнале $\varphi_l(t)$ сконцентрировалась вся неопределенность параметров l -го локального объекта управления, информация о внешних возмущениях, нелинейностях, запаздывании.

Для компенсации негативного действия выделенного сигнала $\varphi_l(t)$ в l -м локальном объекте воспользуемся методом вспомогательного контура [8].

Введем вспомогательный контур

$$(D + a_{ml})\bar{e}_l(t) = \beta_l v_l(t), \quad l = \overline{1, r}. \quad (12)$$

С учетом соотношений (11), (12) составим уравнение

$$(D + a_{ml})\zeta_l(t) = \varphi_l(t), \quad l = \overline{1, r}, \quad (13)$$

где $\zeta_l(t) = y_l(t) - \bar{v}_l(t)$, $\zeta_l(t)$ — рассогласование. Таким образом, если измерению доступны $n_l - m_l - 1$ производные сигналов $v_l(t)$ и первая производная регулируемой величины $e_l(t)$, то, сформировав $v_l(t)$ в виде

$$v_l(t) = -\frac{1}{\beta_l} (D + a_{ml})\zeta_l(t), \quad l = \overline{1, r}, \quad (14)$$

получим, что закон управления (6), (14) обеспечивает асимптотическую устойчивость системы (1), (6), (14) по переменной $e_l(t)$, а уравнение замкнутой системы будет иметь вид $(D + a_{ml}) \times e_l(t) = 0$. Следовательно, из уравнения (5) имеем, что $n_l - m_l$ производные сигнала $e_l(t)$ стремятся к 0. Но для работоспособности системы

необходимо показать, что сигнал $\varphi_l(t)$, $l = \overline{1, r}$, ограничен.

Итак, в случае возможности измерения переречисленных производных $\varphi_l(t) = \frac{1}{T_l(P)} \bar{\varphi}_l(t)$ и из (14) имеем, что $v_l(t) = -\frac{1}{\beta_l} \varphi_l(t)$. Тогда

$$u_l(t) = -\frac{1}{\beta_l} ((k_l - \beta_l) u_l(t) + k_l \frac{\Delta R_l(D)}{R_{0l}(D)} u_l(t) - \frac{\Delta Q_l(D)}{R_{0l}(D)} y_l(t) + \frac{N_l(D)}{R_{0l}(D)} y_l(t - h_l(t)) + \frac{1}{R_{0l}(D)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q D^{n-i} \psi_{ijl}(y_l(t)) \tau_{jl} + \frac{1}{R_{0l}(D)} f_l(t) - \frac{k_{ml}}{R_{0l}(D)} g_l(t)). \quad (15)$$

Составляющие $\frac{\Delta Q_l(D)}{R_{0l}(D)} y_l(t)$, $\frac{N_l(D)}{R_{0l}(D)} y_l(t - h_l(t))$, $\frac{1}{R_{0l}(D)} f_l(t)$ ограничены в силу гурвицевости полинома $R_{0l}(\lambda)$ и условия $\lim_{t \rightarrow \infty} e_l(t) = 0$. Так как сигнал $y_l(t)$ ограничен, $\psi_{ijl}(y_l(t))$ — гладкие функции, удовлетворяющие условию Липшица, то составляющая $\frac{1}{R_{0l}(D)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q D^{n-i} \psi_{ijl}(y_l(t)) \tau_{jl}$ ограничена. Кроме того, задающее воздействие $g(t)$ ограничено в силу предположения 4.

Разрешив уравнение (15) относительно $u_l(t)$, получим

$$u_l(t) = \left(-\frac{\Delta R_l(D)}{R_{0l}(D)} u_l(t) + \frac{\Delta Q_l(D)}{k_l R_{0l}(D)} y_l(t) - \frac{N_l(D)}{k_l R_{0l}(D)} y_l(t - h_l(t)) - \frac{1}{k_l R_{0l}(D)} \times \right. \\ \left. \times \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q D^{n-i} \psi_{ijl}(y_l(t)) \tau_{jl} - \frac{1}{k_l R_{0l}(D)} f_l(t) + \frac{k_{ml}}{k_l R_{0l}(D)} g_l(t) \right). \quad (16)$$

Отсюда с учетом (4) получаем $Q_{ml}(D) y_l(t) = 0$, а из соотношения (15) имеем

$$u_l(t) = \frac{-R_{0l}(D)}{R_{0l}(D) + \Delta R_l(D)} = \left(\frac{\Delta Q_l(D)}{k R_{0l}(D)} y_l(t) - \frac{N_l(D)}{k_l R_{0l}(D)} y_l(t - h_l(t)) - \frac{1}{k_l R_{0l}(D)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q D^{n-i} \psi_{ijl}(y_l(t)) \tau_{jl} - \frac{1}{k_l R_{0l}(D)} f_l(t) + \frac{k_{ml}}{k_l R_{0l}(D)} g_l(t) \right).$$

Так как $R_{0l}(D) + \Delta R_l(D) = R_l(D)$ — гурвицев полином, и $n_l - m_l$ производные $e_l(t)$ стремятся к нулю, то ограничен управляющий сигнал $u_l(t)$, а следовательно, сигналы $\varphi_l(t)$, $\bar{\varphi}_l(t)$, переменная $\zeta_l(t)$ и ее производная в силу (14).

В случае невозможности измерять необходимые производные сигнала $\zeta_l(t)$ сигнал $v_l(t)$ вместо (14) формируем в виде

$$v_l(t) = -\frac{1}{\beta_l} (D + a_{ml}) \bar{\zeta}_l(t), \quad l = \overline{1, r}, \quad (17)$$

где $\bar{\zeta}_l(t)$ — оценка, получаемая с наблюдателя [13]

$$\dot{z}_l = \overline{F}_{0l} z_l(t) + \overline{B}_{0l} (\zeta_l(t) - \bar{\zeta}_l(t)), \\ \bar{\zeta}_l(t) = L_{l2} z_l(t), \quad l = \overline{1, r}, \quad (18)$$

где $z_l(t) \in R^2$, матрицы \overline{F}_{0l} и \overline{B}_{0l} — такие же, как в (9), но только соответствующих размерностей, $L_{2l} = [1, 0]$, $l = \overline{1, r}$. В этом случае справедливо утверждение.

Утверждение. Пусть выполнены условия предположений 1—6, тогда для любого $\delta > 0$ в условиях (3) существуют числа $\mu_l > 0$, $T > 0$ такие, что при $\mu_l \leq \mu_{0l}$ и $t \geq T$ для системы (1), (8), (9), (12), (17), (18) выполнены целевые условия (3) и все переменные в системе ограничены.

Доказательство утверждения. Введем в рассмотрение векторы

$$\sigma_l^T(t) = (v_l(t), Dv_l(t), \dots, D^{n_l - m_l} v_l(t)), \\ z_{0l}^T = [\zeta_l(t), D\zeta_l(t)]$$

и нормированные векторы рассогласований

$$\bar{\eta}_l(t) = \Gamma_{1l}(\sigma_l(t) - \xi_l(t)), \quad \bar{w}_l(t) = \Gamma_{2l}(z_{0l}(t) - z_l(t)),$$

здесь $\Gamma_{1l} = \text{diag}\{\mu_l^{n_l - m_l - 1}, \dots, \mu_l, 1\}$, $\Gamma_{2l} = \text{diag}\{\mu_l, 1\}$. Тогда из соотношений (9) и (18) имеем

$$\begin{cases} \dot{\bar{\eta}}_l(t) = \frac{1}{\mu_l} F_l \bar{\eta}_l - b_{0l} D^{n_l - m_l} v_l(t); \\ \theta_l(t) = \mu_l^{n_l - m_l - 1} L_l \bar{\eta}_l(t); \\ \dot{\bar{w}}_l(t) = \frac{1}{\mu_l} \overline{F}_l \bar{w}_l(t) - \overline{b}_{0l} D^2 \zeta_l(t); \\ \tau_l(t) = \mu_l L_{2l} \bar{w}_l(t), \quad l = \overline{1, r}, \end{cases} \quad (19)$$

где $\overline{F}_l = \overline{F}_{0l} + \overline{B}_{0l} L_{l2}$, $b_{l0}^T = [0, \dots, 1]$, $\overline{b}_{0l}^T = [0, 1]$, $L_{2l} = [1, 0]$, $\theta_l(t) = v_l(t) - \bar{v}_l(t)$, $\tau_l(t) = \zeta_l(t) - \bar{\zeta}_l(t)$, $l = \overline{1, r}$.

Преобразуем уравнения (19) в эквивалентные уравнения относительно выходов $\theta_l(t)$ и $\tau_l(t)$:

$$\begin{cases} \dot{\eta}_l(t) = \frac{1}{\mu_l} F_l \eta_l(t) - b D v_l(t); \\ \theta_l(t) = \mu_l^{n_l - m_l - 1} L_l \eta_l(t); \\ \dot{w}_l(t) = \frac{1}{\mu_l} \bar{F}_l w_l(t) - \bar{b}_l D \zeta_l(t); \\ \tau_l(t) = \mu_l L_{2l} w_l(t), \end{cases} \quad (20)$$

$$b_l^T = [1, 0, \dots, 0], \bar{b}_l^T = [1, 0], l = \overline{1, r}.$$

Уравнения (19) и (20) эквивалентны относительно выходов $\theta_l(t)$ и $\tau_l(t)$, так как являются векторно-матричными формами одних и тех же уравнений:

$$\begin{aligned} \left(D^{n-m} + \frac{b_{1l}}{\mu_l} D^{n_l - m_l - 1} + \dots + \frac{b_{n_l - m_l}}{\mu_l^{n_l - m_l}} \right) \theta_l(t) &= D^{n_l - m_l} v_l(t), \\ \left(D^2 + \frac{d_{1l}}{\mu_l} D + \frac{d_{2l}}{\mu_{12}} \right) \tau_l(t) &= D^2 \zeta_l(t), \quad l = \overline{1, r}. \end{aligned}$$

С учетом (6), (17) и (20) уравнение (11) примет вид

$$y_l(t) = -\mu_l L_{2l} w_l(t), l = \overline{1, r}. \quad (21)$$

Возьмем функцию Ляпунова

$$V_l(t) = \eta_l^T(t) H_l \eta_l(t) + w_l^T(t) H_{1l} w_l(t), l = \overline{1, r},$$

где положительно-определенные матрицы H_l и H_{1l} — решения уравнений

$$\begin{aligned} H_l F_l + F_l^T H_l &= -2\rho_{1l} I, \\ H_{1l} \bar{F}_l + \bar{F}_l^T H_{1l} &= -2\rho_{2l} I_l, \quad l = \overline{1, r}, \end{aligned}$$

и вычислим полную производную на траекториях системы (20):

$$\begin{aligned} \dot{V}_l(t) &= -2 \frac{\rho_{1l}}{\mu_l} |\eta_l(t)|^2 - 2 \frac{\rho_{2l}}{\mu_l} |w_l(t)|^2 - \\ &- 2 \eta_l^T(t) H_l D v_l(t) - 2 w_l^T(t) H_{1l} D \zeta_l(t). \end{aligned} \quad (22)$$

Запишем уравнения (20) в виде

$$\begin{cases} \mu_{1l} \dot{\eta}_l(t) = F_l \eta_l(t) - \mu_{2l} b_l D v_l(t); \\ \mu_{1l} \dot{w}_l(t) = \bar{F}_l w_l(t) - \mu_{2l} \bar{b}_l D \zeta_l; \\ (D + a_{ml}) y_l = -\mu_{2l} (D + a_{ml}) L_{2l} w_l(t); \\ \mu_{1l} = \mu_{2l}, \quad l = \overline{1, r}. \end{cases} \quad (23)$$

Воспользуемся леммой [15].

Лемма [15]. Если система описывается уравнениями $\dot{x} = f(x, \mu_1, \mu_2)$, $x \in R^n$, $\mu = \text{col}(\mu_1, \mu_2)$, $f(x, \mu_1, \mu_2)$ — непрерывная функция, липшицева по x , и при $\mu_2 = 0$ имеет ограниченную замкнутую область диссипативности $\Omega = (x/F(x) < C)$, где $F(x)$ — положительно-определенная, непрерывная, кусочно-гладкая функция, то существует $\mu_0 > 0$ такое, что при $\mu_1 < \mu_0$ и $\mu_2 < \mu_0$ исходная система имеет ту же область диссипативности Ω , если для некоторых чисел $C > 0$, $\bar{\mu}_1 > 0$, $\mu_2 = 0$ выполнено условие

$$\sup_{|\mu_1| \leq \bar{\mu}_1} \left(\left(\frac{\partial F(x)}{\partial x} \right)^T, f(x, \mu_1, 0) \right) \leq -C, F(x) = C.$$

В данном случае, если $\mu_{2l} = 0$ в (23), то это равносильно тому, что все производные измеряются, и добавляются две экспоненциально устойчивые системы $\mu_{1l} \dot{\eta}_l(t) = F_l \eta_l(t)$, $\dot{w}_l(t) = \bar{F}_l w_l(t)$. Как уже доказано, в этом случае все переменные в системе ограничены, и условия леммы выполнены. Иными словами, в области Ω $y_l(t) \rightarrow 0$, $|v_l(t)| < k_{1l}$, $|\zeta_l(t)| < k_{2l}$, а из (8) и (15) следует, что $|D \zeta_l(t)| < k_{3l}$, $|D v_l| < k_{4l}$, где k_{1l} , k_{2l} , k_{3l} , k_{4l} — некоторые положительные константы. Покажем, что в случае $\mu_{2l} \neq 0$, а точнее при $\mu_{1l} < \mu_{0l}$ и $\mu_{2l} < \mu_{1l}$ область диссипативности будет Ω_l .

Положим в системе (23) $\mu_{1l} = \mu_{2l} = \mu_l$ и, подставив их в (22), воспользуемся оценками

$$\begin{aligned} -2 \eta_l^T(t) H_l D v_l(t) &\leq \frac{1}{\mu_l} |\eta_l(t)|^2 + \mu_l \|H_l\| \|D v_l(t)\| \leq \\ &\leq \frac{1}{\mu_l} |\eta_l(t)|^2 + \mu_l \|H_l\| k_{3l}; \\ -2 w_l^T(t) H_{1l} D \zeta_l(t) &\leq \frac{1}{\mu_l} |w_l(t)|^2 + \mu_l \|H_{1l}\| k_{4l}, \\ l &= \overline{1, r}. \end{aligned}$$

Подставив эти оценки в соотношение (22), получим неравенство

$$\begin{aligned} \dot{V}_l(t) &\leq -\frac{\rho_{1l}}{\mu_l} |\eta_l(t)|^2 - \frac{\rho_{2l}}{\mu_l} |w_l(t)|^2 - \frac{1}{\mu_l} (\rho_{1l} - 1) |\eta_l(t)|^2 - \\ &- \frac{1}{\mu_l} (\rho_{2l} - 1) |w_l(t)|^2 + \mu_l (\|H_l\| k_{3l} + \|H_{1l}\| k_{4l}), \\ l &= \overline{1, r}. \end{aligned}$$

Выбрав $\rho_{1l} > 1$ и $\rho_{2l} > 1$, получим

$$\dot{V}_l(t) \leq -\frac{\rho_{1l}}{\mu_l} |\eta_l(t)|^2 - \frac{\rho_{2l}}{\mu_l} |w_l(t)|^2 + \mu_l \beta_l, \quad (24)$$

где $\beta_l = \|H_l\| k_{3l} + \|H_{1l}\| k_{4l}$, откуда следует

$$\dot{V}_l(t) \leq -\beta_{1l}V_l(t) + \mu_l\beta_l, \quad (25)$$

где $\beta_{1l} = \min \left\{ \frac{\rho_{1l}}{\mu_l \bar{\lambda}(H_{1l})}; \frac{\rho_{2l}}{\mu_l \bar{\lambda}(H_{1l})} \right\}$, $\bar{\lambda}(\cdot)$ — максимальное собственное число соответствующей матрицы. Из условия (25) имеем $V_l(t) \leq \frac{\mu_l \beta_l}{\beta_{1l}}$.

Принимая во внимание неравенство $|w_l(t)|^2 \leq \frac{1}{\lambda_l(H_{1l})} V_l(t) \leq \frac{\mu_l \beta_l}{\beta_{1l}}$, из третьего уравнения (23) имеем $|y_l(t)| \leq \mu_l |w_l(t)| \leq \mu_l \sqrt{\frac{\mu_l \beta_l}{\beta_{1l}}}$.

Отсюда видно, что для любых $\delta > 0$ в условии (3) существует μ_{0l} такое, что целевое условие (3) будет выполнено.

4. Числовой пример

Рассмотрим сеть, состоящую из четырех объектов управления, динамические процессы в которых описываются нелинейными дифференциальными уравнениями с запаздыванием по состоянию:

$$\begin{aligned} & (D^4 + a_{1l}D^3 + a_{2l}D^2 + a_{3l}D + a_{4l})y_{1l}(t) = \\ & = (b_{0l}D + b_{1l})u_1 + (c_{1l}D^3 + c_{2l}D^2 + c_{3l}D + c_{4l})f_1(t) + \\ & + (d_{1l}D^3 + d_{2l}D^2 + d_{3l}D + d_{4l})\varphi_{1l}(y_1(t)) + \\ & + (n_{1l}D^3 + n_{2l}D^2 + n_{3l}D + n_{4l})y_1(t - h_l) + \\ & + (m_{1l}D^3 + m_{2l}D^2 + m_{3l}D + m_{4l})\varphi_{2l}(y_1(t)), \quad l = \overline{1,4}. \end{aligned}$$

Задача синхронизации четырех локальных объектов, как отмечено в предположении 2, решается в условиях параметрической неопределенности. Класс неопределенности задан следующими неравенствами: $2 \leq a_{ql} \leq 8$, $20 \leq b_{0l} \leq 50$, $26 \leq b_{1l} \leq 50$, $26 \leq c_{ql} \leq 50$, $l, q = \overline{1,4}$. Уравнение ведущей подсистемы имеет вид: $(D + 3)^3 y_m(t) = 81g(t)$. Следуя предложенным в данной работе алгоритмам управления, выберем:

- полином $T(\lambda) = \lambda^2 + 6\lambda + 9$, $\beta = 50$, $\mu = 0,01$, $a_m = 3$;
- вспомогательные контуры (12) в виде $(D + 3)\bar{v}_l(t) = 50v_l(t)$, $l = \overline{1,4}$;
- уравнения наблюдателей (9) и (18) в виде

$$\begin{cases} \dot{\zeta}_{1l}(t) = \zeta_{2l}(t) + \frac{6}{\mu_l}(v_l(t) - \zeta_{1l}(t)); \\ \dot{\zeta}_{2l}(t) = \frac{8}{\mu_l^2}(v_l(t) - \zeta_{1l}(t)); \\ \bar{v}_l(t) = \zeta_{1l}(t), \quad l = \overline{1,4}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{z}_l(t) = \frac{3}{\mu_l}(\zeta_l(t) - z_l(t)); \\ \bar{\zeta}_l(t) = z_l(t), \quad l = \overline{1,4}; \end{cases}$$

- управляющие воздействия (8) и (17) в виде

$$\begin{aligned} u_l(t) &= \zeta_{1l}(t) + 6\zeta_{2l}(t) + 9\dot{\zeta}_{2l}(t); \\ v_l(t) &= -\frac{1}{50}(3\zeta_{1l}(t) + \dot{z}_l(t)), \quad l = \overline{1,4}. \end{aligned}$$

Моделирование предложенных алгоритмов управления осуществлено в пакете Simulink среды MATLAB для сети четырех объектов управления, математические модели которых представлены в виде:

$$\begin{aligned} & (D^4 + 2D^3 + 2D^2 + 2D + 2)y_1(t) = \\ & = (40D + 26)u_1 + (2D^3 + 2D^2 + 2D + 2)f_1(t) + \\ & + (2D^3 + 4D^2 + 6D + 1)\sin(|y_1(t)|) + \\ & + (4D^3 + 3D^2 + 3D + 3)y_1(t - 1) + \\ & + (2D^3 + 4D^2 + 6D + 1)\ln^2(1 + 4|y_1(t)|); \end{aligned}$$

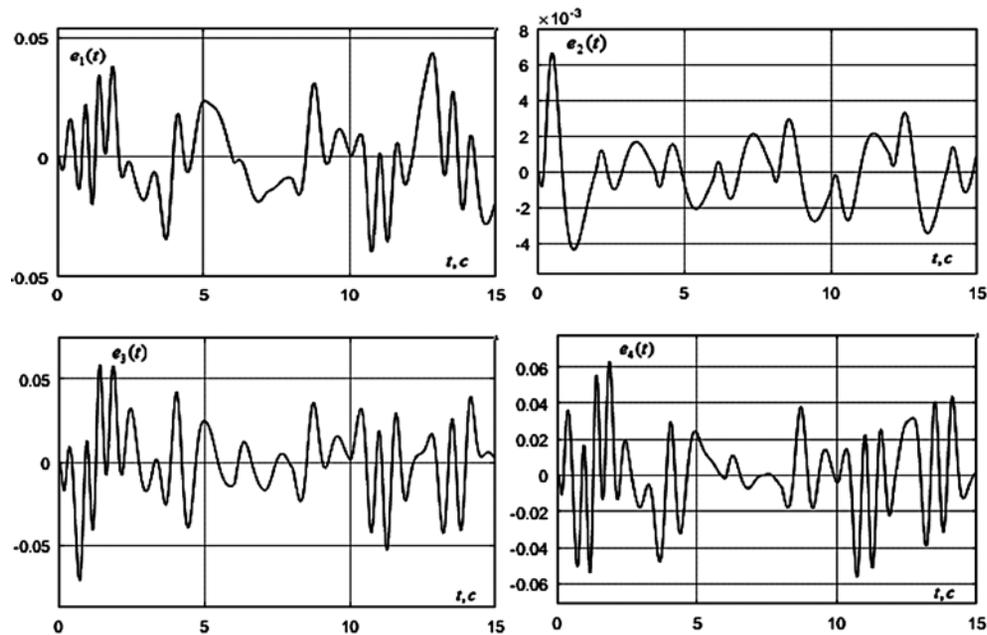
$$\begin{aligned} & (D^4 + 3D^3 + 3D^2 + 3D + 3)y_2(t) = \\ & = (26D + 35)u_2 + (2D^3 - 2D^2 + 8D - 2)f_2(t) + \\ & + (4D^3 + 3D^2 + 3D + 3)\ln^2(1 + 2|y_2(t)|) + \\ & + (2D^3 + 4D^2 + 6D + 1)y_2(t - 8); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (D^4 + 10D^3 + 10D^2 + 10D + 10)y_3(t) = \\ & = (26D + 35)u_3 + (2D^3 - 2D^2 + 8D - 2)f_3(t) + \\ & + (2D^3 + 4D^2 + 6D + 1)\sin(3|y_3(t)|) + \\ & + (2D^3 + 4D^2 + 6D + 1)y_3(t - 3) + \\ & + (4D^3 + 3D^2 + 3D + 3)\ln(2 + |y_3(t)|); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (D^4 + 5D^3 + 5D^2 + 5D + 5)y_4(t) = \\ & = (26D + 35)u_4 + (2D^3 + 2D^2 - 2)f_4(t) + \\ & + (4D^3 + 3D^2 + 3D + 3)\ln^2(1 + 4|y_4(t)|) + \\ & + (2D^3 + 4D^2 + 6D + 1)y_4(t - 1). \end{aligned}$$

На рисунке представлены переходные процессы по ошибкам синхронизации $e_1(t)$, $e_2(t)$, $e_3(t)$, $e_4(t)$.

Точность $\delta = 0,06$ получена при задающем воздействии $g(t) = 81\sin 3t$ и возмущающих воздействиях: $f_1(t) = 10\sin 1,7t$; $f_2(t) = \sin 1,7t$; $f_3(t) = 3\sin t$; $f_4(t) = 2\sin 5t$; $f(t) = 3\sin 1,7t$. Начальные условия нулевые.



Переходные процессы по ошибкам синхронизации $e_1(t)$, $e_2(t)$, $e_3(t)$, $e_4(t)$
 Transients of synchronization errors $e_1(t)$, $e_2(t)$, $e_3(t)$, $e_4(t)$

Заключение

В работе рассмотрен один из возможных подходов к построению робастной системы синхронизации сети нелинейных объектов управления с запаздыванием по состоянию с компенсацией параметрической неопределенности и внешних ограниченных возмущений. В каждом из синхронизируемых локальных объектов используются вспомогательный контур [8] и два наблюдателя [13] производных сигналов системы. С учетом оценок возмущений формируются управляющие воздействия, которые обеспечивают достижимость цели управления с заданной точностью. Результаты численного моделирования в пакете Simulink среды MATLAB подтвердили теоретические выводы и показали хорошую работоспособность системы синхронизации.

Список литературы

1. Кузнецов А. В. Краткий обзор многоагентных моделей // УБС. 2018. № 71. С. 6–44.
2. Fax J. A., Murray R. M. Information flow and cooperative control of vehicle formations // IEEE Trans. Autom. Control. 2004. Vol. 49, N. 9. P. 1465–1476.
3. Olfati-Saber R., Murray R. M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays // IEEE Trans. Autom. Control. 2004. Vol. 49, N. 9. P. 1520–1533.

4. Liu K., Selivanov A., Fridman E. Survey on Time-delay Approach to Networked Control // Annual Reviews in Control. 2019.
5. Проскурников А. В., Фрадков А. Л. Задачи и методы сетевого управления // АиТ. 2016. № 10. С. 3–39.
6. Karimi H. R. Robust Adaptive H_∞ Synchronization of Master-Slave Systems with Discrete and Distributed Time-Varying Delays and Nonlinear Perturbations // Preprint 18 IFAC Word Congr. 2011. P. 302–307.
7. Цыкунов А. М. Робастное управление объектами с последействием. М.: Физматлит, 2014. 301 с.
8. Цыкунов А. М. Алгоритмы робастного управления с компенсацией ограниченных возмущений // АиТ. 2007. № 7. С. 103–115.
9. Фуртат И. Б., Гушин П. А. Алгоритм управления объектами с запаздывающим входным сигналом на базе субпредикторов регулируемой величины и возмущения // АиТ. 2019. № 2, С. 3–23.
10. Hassan L., Zemouche A., Boutayeb M. H_∞ Unknown input observers design for a class of nonlinear time-delay systems // Preprint 18 IFAC Word Congr. 2011. P. 3879–3884.
11. Witrant E., Fridman E., Sename O., Dugard L. Recent results on time-delay systems: Analysis and control // Springer: Advances in delays and dynamics. 2016.
12. Имангазиева А. В., Цыкунов А. М. Робастное управление линейным динамическим объектом с запаздыванием по состоянию // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 12. С. 2–6.
13. Atassi A. N., Khalil H. K. Separation principle for the stabilization of class of nonlinear systems // IEEE Trans. Automat. Control. 1999. V. 44, N. 9. P. 1672–1687.
14. Feuer A., Morse A. S. Adaptive control of single-input, single-output linear systems // IEEE Trans. on Automatic Control. 1978. Vol. 23, № 4. P. 557–569.
15. Брусин В. А. Об одном классе сингулярно-возмущенных адаптивных систем // АиТ. 1995. № 4. С. 119–128.

Synchronization of a Network of Nonlinear Plants with Time Delay as in Condition Under Uncertainty

A. V. Imangazieva, aliya111@yandex.ru,

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, 414025, Astrakhan Branch, Russian Federation,

Corresponding author: **Imangazieva Aliya V.**, PhD, Associate Professor, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, 414025, Astrakhan Branch, Russian Federation, e-mail: aliya111@yandex.ru

Accepted on August 11, 2019

Abstract

Robust algorithms for synchronizing a network of nonlinear plants with time delay are proposed. A network of control plants in the Lurie form with Lipschitz nonlinearities is considered taking into account the time delay under the conditions of constantly operating external uncontrolled disturbances. Taking into account nonlinear and delayed components in mathematical models of plants makes the system close to real. In each local network plant, the input of the leading subsystem is monitored. Dynamic compensation of disturbances in each of the plants is carried out by extracting a signal that carries information about these disturbances, and then suppressing it using an auxiliary circuit and two observers of the system variables. The use of variable observers is due to the need to obtain estimates of the derivatives of the system variables, the measurement of which is not available. A numerical example of the synchronization of a network consisting of four nonlinear control plants with a delay in state under conditions of uncertainty of the parameters of their mathematical models and the action of external bounded disturbances is considered. For the network of plants, the proposed control algorithms are applied. The numerical simulation in the Simulink Matlab package was carried out, the graphs of transient processes for tracking errors for each of the four subsystems are presented. The simulation results confirmed the theoretical conclusions and showed good performance of the proposed synchronization algorithms in the conditions of constantly operating external and internal disturbances.

Keywords: network, robust control, Lipschitz nonlinearities, bounded perturbations, accuracy, time delay, control algorithm, observer, auxiliary circuit.

Acknowledgement: The study was carried out with the financial support of the Russian Federal Property Fund in the framework of the scientific project No. 20-08-00610.

For citation:

Imangazieva A. V. Synchronization of a Network of Nonlinear Plants with Time Delay as in Condition Under Uncertainty, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 5, pp. 266–273.

DOI: 10.17587/mau.21.266-273

References

1. **Kuznetsov A. V.** Brief review of multi-agent models // UBS, 71 (2018), pp. 6–44 (in Russian).
2. **Fax J. A., Murray R. M.** Information flow and cooperative control of vehicle formations, *IEEE Transaction Automatic Control*, 2004, vol. 49, no. 9, pp. 1465–1476.
3. **Olfati-Saber R., Murray R. M.** Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays, *IEEE Transaction Automatic Control*, 2004, vol. 49, no. 9, pp. 1520–1533.
4. **Liu K., Selivanov A., Fridman E.** Survey on Time-delay Approach to Networked Control, *Annual Reviews in Control*, 2019.
5. **Proskurnikov A. V., Fradkov A. L.** Tasks and methods of network management *Avtomatika i upravleniye*, 2016, no. 10, pp. 3–39 (in Russian).
6. **Karimi H. R.** Robust Adaptive H_∞ Synchronization of Master-Slave Systems with Discrete and Distributed Time-Varying Delays and Nonlinear Perturbations, *Preprint 18 IFAC Word Congress*, 2011, pp. 302–307.
7. **Tsykunov A. M.** Robust control of plants with aftereffect, Moscow, Fizmatlit, 2014, pp. 301 (in Russian).
8. **Tsykunov A. M.** Robust control for one class of nonlinear plants with distributed delay, *Problemy upravleniya*, 2016, no. 3, pp. 16–22 (in Russian).
9. **Tsykunov A. M.** Robust control algorithms with compensation of bounded disturbances, *Avtomatika i upravleniye*, 2007, no. 7, pp. 103–115 (in Russian).
10. **Furtat I. B., Gushchin P. A.** The control algorithm for objects with a delayed input signal based on sub-predictors of controlled magnitude and disturbance, *Avtomatika i upravleniye*, 2019, no. 2, pp. 3–23 (in Russian).
11. **Hassan L., Zemouche A., Boutayeb M.** H_∞ Unknown input observers design for a class of nonlinear time-delay systems, *Preprint 18 IFAC Word Congress*, 2011, pp. 3879–3884.
12. **Witrant E., Fridman E., Sename O., Dugard L.** Recent results on time-delay systems: Analysis and control, *Springer: Advances in delays and dynamics*, 2016.
13. **Imangazieva A. V., Tsykunov A. M.** Robust control of a linear dynamic plant with time delay, *Mekhatronika, avtomatizatsiya*, 2007, no. 12, pp. 2–6 (in Russian).
14. **Atassi A. N., Khalil H. K.** Separation principle for the stabilization of class of nonlinear systems, *IEEE Transaction Automatic Control*, 1999, vol. 44, no. 9, pp. 1672–1687.
15. **Feuer A., Morse A. S.** Adaptive control of single-input, single-output linear systems, *IEEE Transaction Automatic Control*, 1978, vol. 23, no. 4, pp. 557–569.
16. **Brusin V. A.** On a class of singularly perturbed adaptive systems, *Avtomatika i upravleniye*, 1995, no. 4, pp. 119–128 (in Russian).

В. О. Тырва, канд. техн. наук, проф., v.tyrva@mail.ru,
А. В. Саушев, д-р техн. наук, зав. каф., saushev@bk.ru,
ФГБОУ ВО "ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова", г. Санкт-Петербург

О реализации совмещаемых управляющих воздействий на объект в системах "человек—машина"

Рассматриваются задачи реализации управляющих воздействий на объект в эргатической системе "человек—машина", совмещаемых через орган управления аппарата человеко-машинного интерфейса, в целях эффективного распределения функций управления между человеком-оператором и управляющим автоматом системы. Выявлены особенности технической реализации управляющих воздействий на объект эргатической системы с помощью аппаратов совместного управления нового типа, через орган управления которых осуществляется информационное взаимодействие между человеком-оператором и автоматом системы. Принцип построения аппаратов совместного управления показан с помощью изобразительных моделей аппаратов дискретного и непрерывного действия, имеющих в своем составе электромеханическое приводное устройство, реагирующее на сигналы от управляющего автомата вследствие перемещения органа управления. В аппаратах предусматривается возможность перемещения органа управления и мускульным усилием человека-оператора.

Для вербальной модели действий и ответных реакций человека-оператора и машины, принятой в инженерной психологии, разработаны математические модели совместного управления объектом эргатической системы, описывающие перемещения органа управления. Математическая модель ответной реакции управляемого объекта системы представлена нормальной системой обыкновенных дифференциальных уравнений. В результате композиции моделей действий и ответных реакций для системы "человек—машина" получено конечное множество неполных представлений элементарных движений изображающей точки в пространстве состояний, на котором конструируется управляемое движение объекта в виде последовательности элементарных движений. Определены виртуальные дискретные сигналы управления, соответствующие конкретным позициям органов управления аппаратов совместного управления человеко-машинного интерфейса системы, по которым осуществляются последовательные переходы от одного элементарного движения к другому.

Приведены результаты апробации совместного управления движением судна с использованием математической модели действий и ответных реакций в натурных экспериментах при повышенных требованиях к безопасности и точности движения. Сформулированы выводы об эффективности применения совместного управления в транспортных эргатических системах "человек—машина". Показано, что в этом случае в наибольшей степени используются и комбинируются достоинства партнеров по управлению.

Ключевые слова: система "человек—машина", человек-оператор, совместное управление, орган управления, автомат

Введение

Для понимания сути решаемых задач рассмотрим пример управления автомобилем при обучении вождению, которое осуществляется совместно обучаемым и инструктором. Учебный автомобиль оснащен дополнительными техническими средствами, позволяющими совмещать управление приложением мускульных усилий к педали тормоза, к рулевому колесу и т. д. Можно привести достаточно много аналогичных примеров применения технических средств и совмещения с их помощью управляющих воздействий на технический объект двух (или более) лиц и в других областях. Вместе с тем современный уровень развития науки и техники позволяет в некоторых случаях вместо одного из операторов, совмещающих управление, использовать автоматическое устройство — автомат. Каждый из двух действующих

частей такой эргатической системы "человек—машина" (СЧМ) имеет свои достоинства и недостатки, влияющие на качество исполнения процесса управления. Поэтому распределение функций управления и взаимодействие человека-оператора (ЧО) и управляющего автомата (УА) в СЧМ должно быть организовано таким образом, чтобы наиболее полно использовать преимущества биологической и технической частей СЧМ в их взаимодействии [1, 2]. Технические устройства взаимодействия должны быть предусмотрены в человеко-машинном интерфейсе (ЧМИ) системы [3, 4]. В качестве таких устройств, как будет показано ниже, могут использоваться органы управления аппаратов, которые воспринимают и реагируют на мускульные усилия ЧО. К ним относятся рычаги управления, джойстики, клавиши, педали или другие воспринимающие внешние воздействия элементы аппаратов: выключатели,

переключатели, различные командоаппараты, используемые в настоящее время для ручного управления.

Исследования в области организации управляемой деятельности СЧМ с помощью аппаратов совместного управления человеком-оператором и управляющим автоматом находятся на начальной стадии развития. Аппараты для совместного управления в указанном смысле не разрабатывались. В связи с этим в настоящей статье: предложены способы технической реализации аппаратов совместного управления для ЧМИ; получено математическое представление разработанной в инженерной психологии модели "действий и ответных реакций" для описания динамики СЧМ в многомерном пространстве состояний при совместном управлении объектом; приведены результаты апробации алгоритмов совместного управления движением судна.

Взаимодействие человека и автомата в совместном управлении

Изучение взаимодействия человека и автомата в совместном управлении объектом базируется на результатах, полученных в области "проектирования взаимодействия" как научного направления благодаря работам А. Купера [5] и других зарубежных и отечественных ученых [6–9].

Одним из основных результатов исследований является "набор поведенческих шаблонов — характерных поведенческих моделей, помогающих классифицировать варианты использования будущего или существующего продукта". В настоящей работе "шаблоны" представляются в форме математических моделей действий ЧО, выраженных через перемещения органов управления ЧМИ. Каждое действие и соответствующее перемещение органа управления побуждается определенной целью. Поэтому проявлением искусственного интеллекта управляющего автомата является перемещение им органов управления ЧМИ в совместном управлении с ЧО. В работе [4] для стадий исследования и моделирования взаимодействия технической и биологической частей СЧМ выделены три уровня управления объектом системы: целеуказание, планирование и исполнение. Конечная (стратегическая) цель такой системы — эргамата — задается ЧО. Эргамат можно представить

как систему кооперативной деятельности ЧО и ассистента — УА, т. е. устройства, самостоятельно выполняющего целенаправленные действия [5]. При такой форме взаимодействия эргамат приобретает свойство "естественности" (с точки зрения человека) — способность обеспечить "антропоморфизм технической части системы на когнитивном уровне".

Анализ исследований и практических реализаций совмещаемых управляющих воздействий на объект показывает, что основное внимание уделяется проблеме "совмещения" воздействий на несколько исполнительных устройств СЧМ от одного органа управления. Например, успешно реализовано и хорошо зарекомендовало себя совмещенное управление истребителем СУ-35 по принципу HOTAS (Hands On Throttle-And-Stick) — руки на секторе газа и ручке управления [6]: "летчик Су-35 на самом деле не управляет самолетом, а с помощью органов управления в кабине информирует о своих намерениях систему управления, которая уже сама решает, как оптимальным по заданному критерию образом реализовать приказ пилота с помощью перемещения аэродинамических управляющих поверхностей и поворотных сопел двигателей". Задача, которая ставится в настоящей статье, заключается в расширении функций ЧМИ таким образом, чтобы о своих намерениях УС информировала ЧО через орган управления. Организацию через орган управления ЧМИ управляющих воздействий как намерений ЧО и УА будем называть *совместным управлением*.

Особенности технической реализации совместного управления

Основной особенностью совместного управления в СЧМ является применение в составе ЧМИ аппаратов управления нового типа — аппаратов совместного управления. Это, в свою очередь, влечет за собой применение для описания функционирования СЧМ математических моделей, которые учитывают действия ЧО, выражающиеся в перемещениях органа управления такого аппарата. Любое занятое органом управления положение должно рассматриваться как необходимая информация о состоянии СЧМ, так как положение органа управления непосредственно и часто очевидным образом связано с целью управления объектом как на

уровне планирования, так и на уровне исполнения [10–13]. Информация о положении органа управления аппарата совместного управления должна по обратным связям передаваться и к ЧО, и к УА. В СЧМ должны быть предусмотрены также каналы передачи намерений ЧО и УА, о которых говорилось выше. На основе этих соображений представим СЧМ структурной схемой (рис. 1), выделив в системе аппарат совместного управления (АпСУ) и его связи с другими компонентами системы.

Управление объектом (рис. 1) осуществляется с помощью АпСУ в режиме, когда ЧО и АпСУ взаимодействуют через орган управления АпСУ. Каналами взаимодействия (вербальными, визуальными и другими) ЧМИ, по которым передается информация V и Y , ЧО связан с УА. С внешней средой СЧМ имеет физические и информационные связи D , S , L . Совместное (результатирующее) управление объектом является результатом преобразования (оператором G) управляющего воздействия u_c , создаваемого ЧО, и управляющего воздействия u_a , вырабатываемого УА и воспринимаемого ЧО как намерение по изменению состояния СЧМ:

$$u = G(u_c, u_a).$$

Принцип построения аппаратов совместного управления представлен изобразительными моделями аппаратов на рис. 2 [14, 15].

При совмещении во времени управляющих воздействий на объект орган управления I АпСУ (рис. 2) способен перемещаться как под действием мускульного усилия ЧО, так и под действием команды, вырабатываемой УА СЧМ [14]. В аппарате совместного управления предусматриваются приводное и преобразовательное устройства. Первое из них приводит в движение орган управления по команде от УА при сохранении возможности перемещения органа управления мускульным усилием ЧО, а второе формирует сигнал управления в виде функциональной зависимости от совмещаемых управляющих воздействий — сигнал, на который реагирует объект, изменяя свое состояние.

Для ЧО сигнал v_a (электрическое напряжение), подаваемый от УА на обмотки 4, 5 поляризованного электромагнитного привода с постоянным магнитом 6 в составе магнитопровода (рис. 2, а), является намерением УА установить орган управления I в определенное положение Q или P (в зависимости от полярности сигнала v_a).

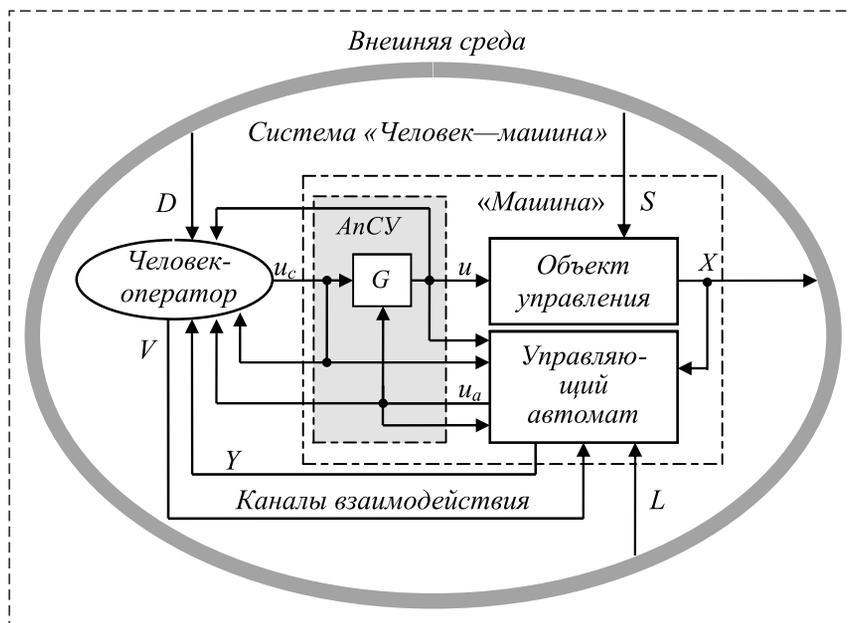


Рис. 1. Функциональная структура системы "человек—машина" с аппаратом совместного управления АпСУ

Fig. 1. Functional structure of the human—machine system with joint control apparatus АпСУ

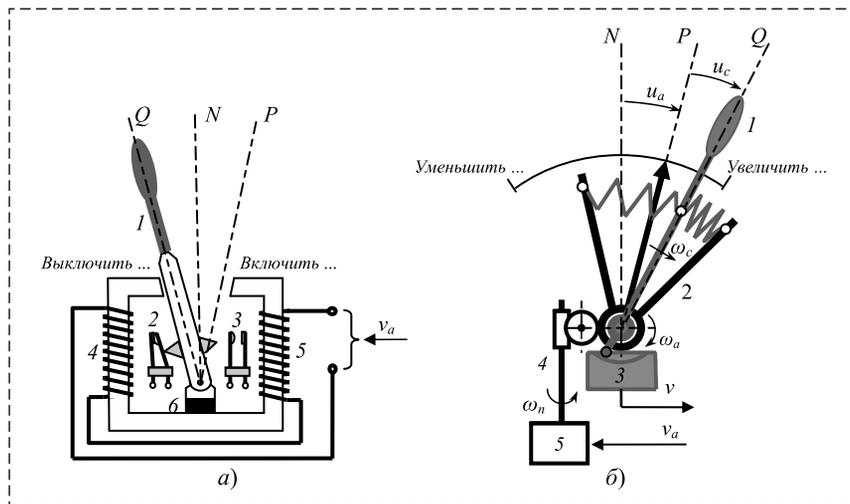


Рис. 2. Изобразительные модели аппаратов совместного управления:

а — дискретного действия; б — непрерывного действия

Fig. 2. Graphic models of collaborative control devices:

а — discrete action; б — continuous operation

Если это происходит, то тем самым формируется сигнал $u = u_a$ управления объектом (см. рис. 1), который с помощью замыкающегося контакта, например контакта 3 (рис. 2, а), передается на исполнение к управляемому объекту. Если ЧО, придерживая рукоятку 1 аппарата, препятствует ее перемещению, несмотря на наличие сигнала v_a , то в результате будет сформирован сигнал $u = u_c$ от ЧО. При этом действие УА остается только "намерением", так как не исполняется аппаратом совместного управления (АпСУ на рис. 1).

Аппарат совместного управления с многопозиционным органом управления 1 на рис. 2, б снабжен аналоговым датчиком углового перемещения 3, который формирует на выходе сигнал v , пропорциональный величине $u = u_a + u_c$ по положению Q органа управления. Перемещение u_a вилки 2 от нейтрального положения N до изменяемого положения P создается электромеханическим преобразователем 5 с червячной передачей 4 по сигналу v_a от УА. Отклонение u_c органа управления является по существу корректирующим управлением, которое реализуется мускульным усилием ЧО, преодолевающим противодействие со стороны пружины относительно вилки 2. Благодаря червячной передаче 4 (рис. 2, б) связь между электромеханическим преобразователем 5 и вилкой 2 однонаправленная — от преобразователя к вилке. Поэтому управляющие действия ЧО при перемещении им органа управления 1 не влияют на работу УА СЧМ и не изменяют сигнал u_a , реализованный в аппарате в виде определенного положения органа управления.

Когда ЧО держит рукой орган управления, то через перемещение рукоятки и возникших усилий из-за упругости пружин он получает информацию о намерениях управляющего автомата изменить текущее состояние объекта. При этом ЧО за счет перемещения органа управления (в положение Q на рис. 2, б) корректирует управляющие действия автомата (положение P на рис. 2, б), если он "не соглашается" с автоматом. Если ЧО не создает корректирующие воздействия на орган управления ($u_c = 0$), то управление объектом осуществляется только автоматом ($u = u_a$).

При отключении или отказе автоматики управление объектом эргатической системы не прерывается, так как его продолжает ЧО, воздействуя на орган управления аппарата совместного управления.

Моделирование действий и ответных реакций системы "человек—машина"

ЧО, реализуя управляющие действия в СЧМ через перемещения органа управления аппарата, может проявлять себя как источник силы и как источник скорости моделируемого движения органа управления. Разнообразие действий применительно к некоторым аппаратам совместного управления [14—16] может быть отражено моделями 2П, 3П и МП, представленными ниже.

Модель 2П. Модель, реализуемая аппаратом дискретного действия с двумя позициями органа управления, например выключателем на рис. 2, а:

$$\left. \begin{aligned} u &= 1 - \text{"Включить ..."} \\ u &= 0 - \text{"Выключить ..."} \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

Модель 3П. Модель, реализуемая аппаратом дискретного действия с тремя позициями органа управления, например переключателем на рис. 2, а:

$$\left. \begin{aligned} u &= 1 - \text{"Увеличить ..."} \\ u &= 0 - \text{"Не изменять ..."} \\ u &= -1 - \text{"Уменьшить ..."} \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

Работа аппарата (рис. 2, а) может быть описана моделью 3П (2), если его привод дополнить возвратной пружиной, переводящей орган управления 1 в нейтральное положение N , когда сигнал $v_a = 0$, и использовать оба контакта 2 и 3 для формирования реверсивного воздействия на управляемый объект по положению u органа управления. Конструктивные параметры аппарата выбираются из условия, чтобы ЧО при необходимости мог препятствовать перемещению органа управления по сигналу от управляющего автомата.

Модель МП. Модель, реализуемая аппаратом непрерывного действия с многопозиционным органом управления, например с задатчиком интенсивности 3 на рис. 2, б:

$$\dot{i} = \omega, \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \omega &= 1 - \text{"Увеличить ..."} \\ \omega &= 0 - \text{"Не изменять ..."} \\ \omega &= -1 - \text{"Уменьшить ..."} \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Модель МПС. Модель, реализуемая аппаратом непрерывного действия с регулируемой

скоростью перемещения органа управления, например с реостатным датчиком угла поворота β на рис. 2, б:

$$\left. \begin{aligned} \dot{u} &= \omega \\ \dot{\omega} &= \varepsilon \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= 1 - \text{"Увеличить ..."} \\ \varepsilon &= 0 - \text{"Не изменять ..."} \\ \varepsilon &= -1 - \text{"Уменьшить ..."} \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Управление u и переменные ω и ε в приведенных выражениях представлены в относительных единицах. Точкой над буквой здесь и далее обозначена операция дифференцирования по времени t .

Модели (1)–(6) не исчерпывают множество моделей действий различных по устройству электрических и электронных аппаратов совместного управления при разнообразии используемых схем подключения аппаратов к электрическим цепям управления. Рассмотренные аппараты и модели действий характерны для СЧМ, в которых для преобразования электрической энергии в механическую энергию движения частей "машины" применяются электроприводы.

Комплексирование моделей действий и ответных реакций выполним на примере моделей (1) – (6) для объекта управления с сосредоточенными параметрами, динамика которого описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями. Воспользуемся методом пространства состояний, по которому состояние СЧМ представляется изображающей точкой на траектории движения в системе фазовых координат и текущего времени. Программирование управляемого движения объекта на стадии планирования управления выполняется с привлечением гипотезы полной определенности [17], распространяемой на описание действий и ответных реакций ЧО и "машины" в СЧМ [14].

Модель реакций объекта управления, обычно получаемую на основе законов физики, представим в форме нормальной системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, u_2, \dots, u_p); \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, u_2, \dots, u_p); \\ &\vdots \\ \dot{x}_n &= f_n(x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, u_2, \dots, u_p), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где x_1, x_2, \dots, x_n — фазовые координаты, характеризующие текущее состояние объекта управления СЧМ; u_1, u_2, \dots, u_p — переменные управления, значения каждой из которых определяется положением органа управления соответствующего аппарата совместного управления.

Предположим, для обобщения, что в ЧМИ СЧМ применяется P_a аппаратов модели 2П (1), P_b аппаратов модели 3П (2); P_c аппаратов модели МП (3), (4) и P_d аппаратов модели МПС (5), (6). Введем дополнительно P_c фазовых координат $x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_{n+P_c}$ вместо $u_{P_a+P_b+1}, u_{P_a+P_b+2}, \dots, u_{P_a+P_b+P_c}$ в соответствии с (3); P_d переменных состояния $x_{n+P_c+1}, x_{n+P_c+3}, \dots, x_{n+P_c+2P_d-1}$ вместо $u_{P_a+P_b+P_c+1}, u_{P_a+P_b+P_c+2}, \dots, u_p$ и P_d переменных состояния $x_{n+P_c+2}, x_{n+P_c+4}, \dots, x_{n+P_c+2P_d}$ в соответствии с (5). Обозначим через $N = n + P_c + 2P_d$ общее число фазовых координат СЧМ $x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1}, \dots, x_N$ и объединим все фазовые координаты в матрицу-столбец X . Далее, используя для каждого управления u_1, u_2, \dots, u_p его модель в соответствии с (1)–(6), получим из системы уравнений (7) множество Z неполных представлений элементарных движений СЧМ

$$Z = \{ \dot{X} = F^r(X), r = 1, 2, \dots, s \} \quad (8)$$

в пространстве состояний $R^{1+N} = \{t \times x_1 \times x_2 \times \dots \times x_N\}$ $(1 + N)$ измерений. Здесь $F^r(X)$ — вектор-функция от X , отображающая правую часть системы (7) и модели (1)–(6); r — порядковый номер вектор-функции $F^r(X)$ в множестве Z .

Множество (8) является моделью действий и ответных реакций СЧМ. Число элементов этого множества $s = 2^{P_a} \cdot 3^{P_b+P_c+P_d}$.

Апробация элементов совместного управления в эргатической системе "судоводитель—судно"

Алгоритмы совместного управления для эргатической системы "судоводитель—судно" выработывались и проверялись на основе построения математических моделей действий, ответных реакций и натуральных экспериментов ввода судов в камеру шлюза от причальной стенки вне шлюза [14, 16]. Для описания действий по связи между положением органа управления (главным двигателем) и упором винта использовалась модель МП (3), (4). Динамика системы "судоводитель—судно" представлена системой

дифференциальных уравнений в четырехмерном пространстве состояний. Число элементов множества (8) $R = 3^1 = 3$.

При конструировании программного движения судна по множеству (8) использовался критерий максимального быстродействия (в целях повышения пропускной способности шлюза), учитывались условия повышенной опасности и требования по точности позиционирования судна в камере шлюза.

Алгоритмы управления движением одновинтового судна построены в виде последовательности дискретных сигналов управления, по которым осуществляется переход от одного элементарного движения к другому. Они реализованы с помощью аппарата, функционально подобного аппарату с многопозиционным органом управления, изображенному на рис. 2, б.

Ограничимся при рассмотрении алгоритмов управления только последовательностями неполных представлений элементарных движений из множества (8), которые были экспериментально апробированы, причем в роли экспертов выступали судоводители.

Движение судна начинается от причальной стенки вне шлюза (координата положения судна $x_1 = -a$, $a > 0$) из состояния покоя судна (скорость движения $x_2 = 0$, координата органа управления $x_3 = u = 0$) и заканчивается в требуемом месте в камере шлюза ($x_1 = 0$) состоянием покоя судна (без движения: $x_2 = 0$, $x_3 = 0$). Этим состояниям покоя соответствуют первый и последний элементы последовательности элементарных движений. Сами последовательности для различных алгоритмов управления продольным движением судна представим с помощью временных диаграмм изменения скорости ω перемещения органа управления (рис. 3) по модели МП (3), (4).

Реализация решения классической задачи максимального быстродействия по алгоритму "полный вперед — полный назад" на последовательности из семи элементарных движений показана на рис. 3, а (вариант 1). Начало движения — в момент t_1 , окончание движения — в момент t_6 . Экспертные оценки такого управления отрицательные: недостаточно обеспечены безопасность и точность позиционирования судна.

Управление судном, которое является оптимальным по быстродействию при ограничении скорости движения судна при вводе его в камеру шлюза показано на рис. 3, б (вариант 2).

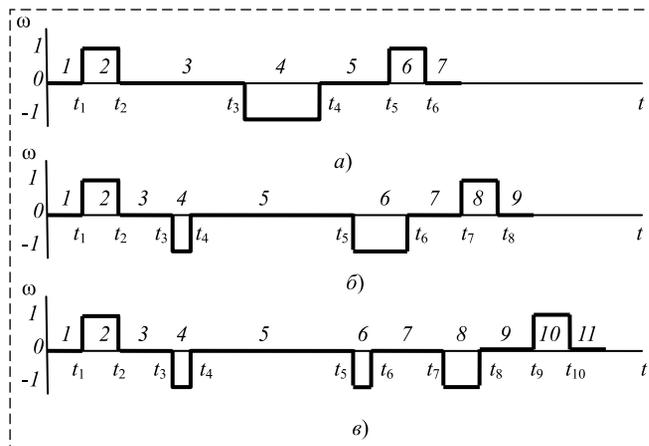


Рис. 3. Временные диаграммы управления гребным винтом судна:

а — вариант 1; б — вариант 2; в — вариант 3

Fig. 3. Propeller Propeller Program Timing Diagrams:

a — option 1; б — option 2; в — option 3

Число элементарных движений — 9. Начало движения — в момент t_1 , окончание движения — в момент t_8 . Продолжительность ввода судна в камеру шлюза увеличилось. Недостаток управления — не гарантирована необходимая точность остановки судна в камере шлюза.

На рис. 3, в (вариант 3) показано управление, у которого к предыдущему алгоритму управления добавлено снижение скорости движения судна перед элементарным движением на заключительном участке траектории активного торможения судна. Число элементарных движений — 11. Начало движения — в момент t_1 , окончание движения — в момент t_{10} . По сравнению с оптимальным по быстродействию движением продолжительность ввода судна в камеру шлюза увеличилась на той же длине пути на 40 %. Повышена точность позиционирования судна в камере шлюза и безопасность управляемого движения. Экспертная оценка алгоритма управления положительная.

Эксперименты показали, что планируя движение судна, т. е. переходы от одного элементарного движения к другому элементарному движению, например увеличивая или уменьшая скорость движения, судоводитель представляет, из какого положения и в какое положение необходимо перевести орган управления, т. е. по существу решает достаточно простую терминальную задачу, связывая желаемое движение судна с требуемым движением путем перемещения органа управления в определенное им положение. Точность такого управления и безопасность плавания при наличии адекватной ма-

тематической модели управляемого движения судна могут быть повышены управляющим автоматом на основе необходимых математических вычислений по модели действий и ответных реакций с помощью управляющей ЭВМ.

Заключение

Предложенный способ распределения функций управления между ЧО и УА в эргатической СЧМ с помощью аппаратов совместного управления способствует повышению эффективности (безопасности, надежности, точности) управления динамикой состояния СЧМ. Принцип построения таких аппаратов показан с помощью изобразительных моделей аппаратов дискретного и непрерывного действия с электромеханическими приводными устройствами, управляемыми от УА.

Математическое описание вербальной модели действий и ответных реакций СЧМ, разработанной в инженерной психологии, выражено множеством неполных представлений элементарных движений в едином для них пространстве состояний СЧМ. Системы обыкновенных дифференциальных уравнений этого множества являются исходным базисом для конструирования управляемых движений объекта СЧМ на стадиях планирования и исполнения совместного управления.

В совместном управлении реализуются преимущества автоматизации по точности и быстродействию действий по сравнению с возможностями ЧО. При этом сохраняются возможности реализации функций управления квалифицированным ЧО в сложных и непредвиденных ситуациях.

Практическое применение совместного управления целесообразно в эргатических системах "человек—машина", которые являются сложными многоцелевыми и многорежимными системами, работающими в условиях изменяющейся обстановки, особенно в априори непредсказуемом разнообразии, что характерно, например, для подвижных объектов в различных средах. Положительные результаты получила апробация совместного управления в системе "судоводитель—судно" при решении задач оптимального по быстродействию и безопасного по исполнению ввода судна в камеру шлюза.

Список литературы

1. **Сергеев С. Ф.** Нейроадаптивные биоморфные интерфейсы в эргатических системах: проблемы и решения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 9. С. 599—605.
2. **Лохин В. М., Манько С. В., Александрова Р. И., Романов М. П., Диане С. А. К.** Принципы построения и программно-алгоритмическое обеспечение человеко-машинного интерфейса для автономных роботов и мультиагентных робототехнических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 9. С. 606—614.
3. **Fiset J. Y.** Human-machine interface design for process control applications. ISA, 2009. 171 p.
4. **Larichev O. I., Methlie L. B., Sprague R. H.** Problem of Man Machine Interaction in Decision Support Systems // Knowledge Representation for Decision Support Systems. Amsterdam: North — Holland Publ. Co, 1985. P. 27—39.
5. **Cooper A., Reimann R., Cronin D.** About Face 3. The Essentials of Interaction Design. Wiley Publishing, Inc., 2007. P. 1—6.
6. **Raskin J.** The humane interface: new directions in the design of computer systems. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. New York, NY, United States. 233 p.
7. **Сергеев С. Ф.** Методологические проблемы человеко-машинного интерфейса // XII Всероссийское совещание по проблеме управления ВСПУ-2014. Москва 16—19 июня 2014 г. Сб. трудов ВСПУ-2014. С. 6414—6421.
8. **Alciatore D.** Introduction to mechatronics and measurement system. New York. USA: McGraw-Hill, 2011. 472 p.
9. **Кальченко В. А.** Общие эргономические требования к проектированию и анализу деятельности человека-оператора системы "человек—машина" // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. 2005. № 32. С. 42—43.
10. **Ющенко А. С.** Человек и робот — совместимость и взаимодействие // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 1(2). С. 4—9.
11. **Ющенко А. С.** Ситуационное управление и робототехника // Материалы III Поспеловских чтений "Искусственный интеллект сегодня. Проблемы и перспективы". 2007. URL: <http://www.posp.raai.org/?arch> (дата обращения 28.10.2009).
12. **Почему Су-35 самый опасный истребитель в мире?** URL: <http://www.kramola.info/vesti/novosti/pochemu-su-35-samyu-opasnyu-istrebitel-v-mire> (дата обращения 23.08.2017).
13. **Рирков К. А., Ustyuzhanin A. D.** Intelligent Systems // Proceedings of the International Scientific Conferences Intelligent Systems and Intelligent CAD's. 2005. Vol. 3. P. 90—95.
14. **Тырва В. О.** Совместное управление объектом в эргатической системе: модели и реализации // Вестник ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. 2018. Т. 10, № 2. С. 439—443.
15. **Saushev A., Tyrva V., Kovtun L.** Joint control actions on electromechanical devices in ergatic systems // E3S Web Conf. Volume 135, Innovative Technologies in Environmental Science and Education (ITESE—2019), Section Environmental Engineering. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913501006>.
16. **Tyrva V., Saushev A., Shergina O.** Automation elements of mental activity and actions of human operator in ergatic system 'man-machine' // International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON 2018.
17. **Моисеев Н. Н.** Элементы теории оптимальных систем. М.: Наука, 1975. 526 с.

About Realizations of Compatible Control Impacts on the Object in the Man—Machine Systems

V. O. Tyrva, v.tyrva@mail.ru, A. V. Saushev, saushev@bk.ru,

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg 198035, Russian Federation

Corresponding author: Tyrva Vladimir O., Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg 198035, Russian Federation, e-mail: v.tyrva@mail.ru

Accepted on January 23, 2020

Abstract

We consider the problems of implementing control actions on the object in the ergatic system "man—machine", combined through the control body of the human-machine interface apparatus, in order to effectively distribute the control functions between the human operator and the system's control automat. Peculiarities of technical realization of operating influences on object ergatic system using the apparatus combines new type of control, through a management body of which is communication between a human operator and automatic system. The principle of construction of joint control devices is shown with the help of pictorial models of discrete and continuous operation devices that have an Electromechanical drive device that reacts to signals from the control machine due to the movement of the control body. The devices provide for the possibility of moving the control body and the muscular effort of the human operator. For the verbal model of actions and responses of the human operator and the machine, adopted in engineering psychology, mathematical models of joint control of the object of the ergatic system, describing the movements of the control body, are developed. The mathematical model of the response of the controlled object of the system is represented by a normal system of ordinary differential equations. As a result of composition of models of actions and reactions for the system "man—machine" obtained a finite set of incomplete representations of the elementary movements depicting point in the state space, which is constructed for controlled movement of an object in a sequence of elementary movements. Virtual discrete control signals corresponding to specific positions of the control bodies of the joint control devices of the human-machine interface of the system, which are used for sequential transitions from one elementary movement to another, are determined. The results of approbation of joint traffic control of vessels using a mathematical model of actions and responses in full-scale experiments with increased requirements for safety and accuracy of movement are presented. Conclusions are formulated about the effectiveness of the use of Sov-local management in transport ergatic systems "man—machine". It is shown that in this case, the advantages of management partners are most used and combined.

Keywords: human—machine system, human-operator, joint control, control body, automatic machine

For citation:

Tyrva V. O., Saushev A. V. About Realizations of Compatible Control Impacts on the Object in the Man—Machine Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 5, pp. 274—281.

DOI: 10.17587/mau.21.274-281

References

1. Sergeev S. F. Biomorphic Neuroadaptive Interfaces in the Ergatic Systems: Problems and Solutions, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 9, pp. 599—604 (in Russian).
2. Lokhin V. M., Manko S. V., Alexandrova R. I., Romanov M. P., Diane S. A. K. Man-Machine Interface for Autonomous Robots and Multi-Agent Robotic Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 9, pp. 606—614 (in Russian).
3. Fiset J. Y. Human-machine interface design for process control applications, ISA, 2009, 171 p.
4. Larichev O. I., Methlie L. B., Sprague R. H. Problem of Man Machine Interaction in Decision Support Systems, *Knowledge Representation for Decision Support Systems*, Amsterdam, North — Holland Publ. Co., 1985, pp. 27—39.
5. Cooper A., Reimann R., Cronin D. About Face 3. The Essentials of Interaction Design, Wiley Publishing, Inc., 2007, pp. 1—6.
6. Raskin J. The humane interface: new directions in the design of computer systems, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., New York, NY, 233 p.
7. Sergeev S. F. Methodological problems of the human-machine interface, *Proc. XII Vserossiyskoye soveshchaniye po probleme upravleniya VSPU-2014*, Moscow 16—19 iyunya 2014 g., pp. 6414—6421 (in Russian).
8. Alciatore D. Introduction to mechatronics and measurement system, New York, USA, McGraw-Hill, 2011, 472 p.
9. Kalichenko V. A. General ergonomic requirements for the design and analysis of the activities of the human operator of the human-machine system, *Chelovecheskiy faktor: problemy psikhologii i ergonomiki*, 2005, no. 32, pp. 42—43 (in Russian).
10. Yushchenko A. S. Man and Robot — Compatibility and Interaction // *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika*, SPb, Publishing house of TSNIIRTK, 2014, no. 1(2), pp. 4—9 (in Russian).
11. Yushchenko A. S. Situational management and robotics, *Materialy III Pospelovskikh chteniy "Iskusstvennyy intellekt segodnya. Problemy i perspektivy"*, 2007, available at: <http://www.posp.raai.org/?arch> (data of access 28.10.2009) (in Russian).
12. Why is the Su-35 the most dangerous fighter in the world? available at: <http://www.kramola.info/vesti/novosti/pochemu-su-35-samyy-opasnyy-istrebitel-v-mire> (data of access 23.08.2017) (in Russian).
13. Pupkov K. A., Ustyuzhanin A. D. Intelligent Systems, *Proceedings of the International Scientific Conferences Intelligent Systems and Intelligent CAD's*, 2005, vol. 3, pp. 90—95.
14. Tyrva V. O. Joint control of an object in an ergatic system: models and implementations, *Vestnik GUMRF imeni admirala S. O. Makarova*, 2018, vol. 10, no. 2, pp. 439—443 (in Russian).
15. Saushev A., Tyrva V., Kovtun L. Joint control actions on electromechanical devices in ergatic systems, *E3S Web Conf. Volume 135, Innovative Technologies in Environmental Science and Education (ITESE—2019), Section Environmental Engineering*, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913501006>.
16. Tyrva V., Saushev A., Shergina O. Automation elements of mental activity and actions of human operator in ergatic system 'man-machine', *International Russian Automation Conference, Rus-AutoCon 2018*, DOI: 10.1109/RUSAUTOCON 2018.
17. Moiseev N. N. Elements of the theory of optimal systems, Moscow, Nauka, 1975, 526 p. (in Russian).

В. И. Городецкий, д-р техн. наук, проф., vladim.gorodetsky@gmail.com,
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
имени В. И. Ульянова (Ленина),

Р. М. Юсупов, член-корр. РАН, проф., yusupov@iias.spb.su,
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

Искусственный интеллект: метафора, наука и информационная технология

В настоящее время научное направление в информатике, метафорически называемое искусственным интеллектом (ИИ), а также информационные технологии, построенные на его основе, приобретают стратегическую важность как теоретический и технологический базис цифровой экономики XXI века. Ведущие экономики мира инвестируют огромные деньги в исследования и разработки по ИИ. В ряде стран, например, в США и Европе, начаты работы по стандартизации технологий ИИ. В Российской Федерации Президентом подписана "Национальная стратегия развития технологий в области ИИ".

Однако нужно признать, что до настоящего времени среди исследователей и разработчиков, включая специалистов индустрии ИИ, пока что нет единого мнения об объекте исследований ИИ, о его целях, научном содержании, методологии, методах и алгоритмах ИИ, о существовании его технологий и об актуальных направлениях его развития.

В данной работе ИИ рассматривается как научная дисциплина, которая является разделом информатики. В ней объектом исследований являются знания, а научное содержание определяется методологиями, методами и алгоритмами получения, формального представления, а также использования знаний в прикладных системах принятия решений. Информационные технологии, построенные на теоретической базе ИИ, называются интеллектуальными технологиями, или технологиями ИИ.

Для обоснования этой точки зрения в работе кратко описываются основные этапы развития ИИ, анализируются различные аспекты исследований ИИ и интеллектуальных технологий, а также различные точки зрения на них в смежных областях и в междисциплинарном контексте. Проводится анализ содержания базовых научных и прикладных проблем получения, представления и использования знаний, а также конкретных прикладных задач ИИ, которые, по мнению авторов работы, должны составить основное содержание дорожной карты исследований и прикладных разработок в рамках упомянутой Национальной стратегии развития технологий ИИ.

Ключевые слова: искусственный интеллект, информатика, знания, получение знаний, представление знаний, использование знаний, принятие решений

Введение

В настоящее время научное направление в информатике, называемое метафорически "искусственный интеллект" (ИИ), а также информационные технологии (ИТ), построенные на его основе, приобретают стратегическое значение как теоретический и технологический базис цифровой экономики XXI века. Ведущие экономики мира вкладывают огромные средства в исследования и разработки в области ИИ и интеллектуальных технологий. В ряде стран, например, в США начаты работы по стандартизации технологий ИИ. В России Президентом подписана "Национальная стратегия развития технологий в области искусственного интеллекта" (далее для краткости — НС).

В НС ИИ рассматривается как "комплекс технологических решений, позволяющих имитировать когнитивные функции человека, получая результаты, сопоставимые как минимум с результатами интеллектуальной деятельно-

сти человека" [1]. Такой взгляд на ИИ, по меньшей мере, настораживает, поскольку он явно провозглашает задачу "имитации когнитивных функций человека" как самоцель стратегии, для реализации которой и должен быть создан "комплекс технологических решений".

Однако следует признать, что в настоящее время среди ученых и специалистов в области информатики и ИТ, включая индустриальных разработчиков новейших приложений технологий ИИ, нет единого мнения об объекте исследований ИИ, о целях и существовании этих исследований и разработок, о научном содержании и специфической методологической базе ИИ, что ведет к неоднозначному мнению и о существовании технологий ИИ.

Среди ученых и специалистов в этой области нередко встречаются мнения об ИИ как об альтернативе естественному интеллекту, реализованной в вычислительной среде. Заметим, что точка зрения НС по существу провозглашает практически ту же точку зрения на

уровне официального мнения. Другие представители научного сообщества настаивают на "ведущей роли компьютерных наук в развитии искусственного интеллекта" и утверждают, что "Основная проблема разработки "комплекса технологических решений", о котором идет речь в НС, прежде всего, в архитектуре и "программном обеспечении" самих "интеллектуальных" вычислителей" [2]. Существуют и другие трактовки существа ИИ, которые в большинстве своем рассматривают содержание и цели ИИ либо однобоко, либо вне контекста ИТ. К сожалению, в дискуссиях на эту тему нередко основные усилия расходятся на философскую трактовку ИИ, и значительно реже затрагиваются детали его научного содержания. Кроме того, этот плюрализм мнений сильно усложняется традиционным невежеством журналистов, создающих информационный шум, заглушающий мнения специалистов и активно продвигаемый в органы исполнительной власти. В результате такого разнообразия в понимании сути ИИ как науки, эмоциональных и часто искаженных оценок появляются весьма однобокие трактовки целей и задач НС. Следствием этого может быть провал всех передовых *технологических* намерений НС.

Представляется, что ключевое содержание НС представлено термином "комплекс технологических решений", и совершенно очевидно, что речь идет о таких решениях в области интеллектуальных ИТ. В этом состоит прагматическая цель НС, которая в своей преамбуле явно ассоциируется с такими программами, как "Стратегия развития информационного общества РФ на 2017–2030 годы", национальная программа "Цифровая экономика РФ", дорожные карты "Национальной технологической инициативы", и с другими программами, "эффективность реализации которых может быть повышена за счет использования технологий ИИ" [1, стр. 2].

В данной работе научное направление с названием "искусственный интеллект" трактуется с прагматических позиций как один из разделов информатики, в котором принятие решений основывается на *знаниях*, а его научное содержание определяется методологиями, методами и алгоритмами *получения, компьютерного представления и использования знаний* в прикладных системах принятия решений. В свою очередь, интеллектуальные ИТ рассматриваются как "комплекс технологических решений", о котором идет речь в НС.

ИИ как раздел информатики не ставит цели воспроизведения естественного интеллекта с какой-то мерой аналогии и не претендует на создание альтернативы естественному интеллекту. НС тоже не претендует на создание "сильного ИИ", полностью реализующего возможности естественного интеллекта. В ближайшее время, которое охватывает временной горизонт реализации НС, это будет абсолютно невозможно, и в этом авторы данной работы солидарны с мнением авторов работы [2]. В контексте современного понимания ИИ его связь с естественным интеллектом видится в том, что ИИ включает в свой методологический базис методы принятия решений на основе знаний, которые в чем-то аналогичны или схожи с методами, применяемыми человеком, как они понимаются сейчас.

Однако основу методов принятия решений в системах ИИ, включая и методы, рассматриваемые как аналоги процессов принятия решений человеком, составляют все-таки знания, а не конкретные и тем более обязательно человеческие механизмы. В рамках ИТ термин "искусственный интеллект" используется в качестве метафоры, удобной для позиционирования методов, алгоритмов, инструментов и технологий ИИ в контексте более общей науки, называемой "Информатика" и технологий, называемых "Информационные технологии". Такой прагматический взгляд на ИИ, очищенный от философских аспектов, отделенный от проблем физиологии мозга и защищенный от информационного шума "специалистов", необходим для того, чтобы рассматривать НС с прагматических позиций, диктующих адекватную дорожную карту исследований и разработок в интересах создания целевого "комплекса технологических решений" на основе ИИ и их последующего использования для эффективного решения задач цифровой экономики.

Для достижения поставленных целей в дальнейшем материале работы сначала кратко характеризуются основные этапы развития ИИ и интеллектуальных ИТ, анализируются различные проблемы ИИ и разные точки зрения на их реализацию в виде интеллектуальных технологий. Основное содержание работы касается характеристики ИИ и интеллектуальных ИТ как неотъемлемых компонентов информатики. В этом контексте приводится анализ базовых проблем ИИ, определяющих современные технологические тренды, решение

которых, по мнению авторов, должно определять существо *дорожной карты* исследований и прикладных разработок, и которые позволяют создать целевой "комплекс технологических решений" как результат выполнения НС.

Немного истории

Строго очертить какое бы то ни было научное направление невозможно в принципе, и доказательством тому служат многочисленные безуспешные попытки представить иерархическую классификацию науки, встроить в нее новые междисциплинарные проблемы и новые научные направления, которые появляются регулярно. Еще сложнее было бы описать как-то строго научное направление "Искусственный интеллект", в название которого входит такой совсем уже неопределенный кросс-доменный термин, как "интеллект", используемый в ряде наук и в очень разнообразном смысле.

Важно отметить, что в период зарождения ИИ как раздела кибернетики его описание не было связано напрямую с интеллектом человека. Согласно Дж. Маккарти ИИ-исследователи вольны "использовать методы, которые не наблюдаются у людей, если это необходимо для решения конкретных проблем" [3]. В этой цитате самыми важными являются слова — "для решения конкретных проблем". Это подчеркивает тот факт, что сам термин "искусственный интеллект" для основателей ИИ как научного направления не являлся важным, важнее было содержание, которое они в него вкладывали.

В процессе более чем 60-летних исследований и разработок в области ИИ изменялось содержание его задач и существо его методов, инструменты для исследований и приоритетность разделов ИИ. Соответственно изменялось содержание и множилось число трактовок термина "искусственный интеллект". Эта динамика имеет место сейчас, и она сохранится в будущем.

Однако большинство "противоречий" в трактовке понятия "искусственный интеллект" обусловлено различием базового смысла, который вкладывается авторами трактовок в этот термин. Если говорить коротко, то эти "противоречия" обусловлены или традиционной омонимией — множеством различных смыслов термина, и тогда противоречия естественны, или они обусловлены кросс-доменной сущностью термина "искусственный интеллект".

Автор термина "искусственный интеллект" Дж. Маккарти описал его как интеллект "вообще" — это "вычислительная" составляющая того, что помогает субъекту достигать заданных целей. Это значит, что для создания или развития интеллектуальных информационных технологий и систем ИИ человеку, с точки зрения Дж. Маккарти, и не надо разбираться в том, как именно работает его мозг.

Описанное выше понимание было дано "отцами" ИИ, которые были специалистами в области компьютерных наук и ввели этот термин как метафорическое название определенного класса методологий, методов и алгоритмов вычислений, использование которых позволяло им решать новые, более сложные классы задач и программировать новые классы приложений. Эта точка зрения, по существу, отвечает взгляду на ИИ и его технологии как на раздел информатики. В настоящее время эта точка зрения разделяется многими специалистами в области ИИ, которые занимаются исследованиями и разработками интеллектуальных технологий и приложений [4].

Важно отметить, что исследователи в области нейробиологии, психологии и философии сознания использовали термин "интеллект" задолго до появления вычислительного взгляда на этот термин в контексте информатики и ИИ. Естественно, что этот термин и сейчас используется ими в "своем" смысле, а именно как "человеческий интеллект", т. е. как название для того, что определяет мотивацию, поведение, принятие решений, эмоции человека и многое другое, свойственное ему. При этом они рассматривают мозг как физический носитель структур и процессов, ответственных за проявление интеллекта. Поэтому появление научного направления ИИ, эксплуатирующего слово "интеллект", специалистами названных наук стало ассоциироваться с механизмами работы мозга человека. И на начальном этапе становления и развития ИИ это не вызвало каких-либо возражений со стороны сторонников вычислительного взгляда на ИИ, поскольку они увидели в этих ассоциациях потенциальный источник дополнительных моделей, методов и алгоритмов для расширения практических возможностей уже провозглашенной ими вычислительной парадигмы ИИ. По сути, это "молчаливое согласие" породило кросс-доменное научное направление на стыке нейробиологии и ИТ.

Это казалось естественным, поскольку практически в это же время была предложена формальная модель перцептрона, которая ввела в обиход концепцию нейросети. И она оказалась привлекательной для специалистов в области ИИ не только как некоторая новая модель обучения распознаванию и принятию решений, но и как шаг в направлении обогащения ИИ формальными (алгоритмическими) моделями, имитирующими, хоть и совсем отдаленно, механизмы обучения и принятия решений человеком и, как тогда казалось, другие функции его головного мозга. В последующем эта концепция развивалась специалистами ИИ в рамках его направления, названного *коннекционизмом* (англ. *connectionism*), в котором формальная модель под названием "нейросеть", заимствованная у нейробиологов, стала основной.

Успехи этих наук, а также новые возможности электроники, ИТ и коннекционистских (нейросетевых) моделей ИИ привели в начале 2000-х годов к появлению на стыке нейробиологии и ИИ кросс-доменного научного направления под названием "Информатика мозга" (англ. *Brain informatics*) [5]. С тех пор в этом направлении плодотворно и активно сотрудничают специалисты обоих направлений. Заметным практическим результатом этих работ к настоящему времени является создание нейроинтерфейсов, которые позволяют использовать сигналы, структуры и механизмы управления головного мозга для управления физическими устройствами, главным образом протезами.

Новое звучание проблемы вычислительного ИИ получили с середины 2000-х годов в связи с достижениями в области семантических вычислений и технологий, которые, можно сказать, "очеловечили" вычислительный ИИ [6, 7]. Заметим, что вычисления называют *семантическими*, если они выполняются с контентом, семантика которого четко определена в терминах естественного языка (ЕЯ), и результат также получается с четко заданной семантикой. В частности, эти вычисления решают задачи вычисления смысла контента, семантической интеграции гетерогенных знаний и данных. Они реализуют семантические интерфейсы, пользовательские и машиночитаемые, предоставляют ЕЯ-средства для взаимодействия роботов и человека и т. п.

Появление модели *глубокого обучения* как нового этапа развития нейросетевых технологий ИИ примерно к 2010 году привело к новой волне достижений на основе нейросетевых

моделей ИИ [8]. В частности, это коснулось широкого сегмента трудных задач обработки изображений, обработки речи и текстов на ЕЯ. К сожалению, это вызвало не вполне адекватную эйфорию среди апологетов нейросетевых технологий. Некоторые из них уверены в том, что все проблемы ИИ решаемы с помощью нейросетевых моделей глубокого обучения, и они активно продвигают это мнение "в массы".

Обобщая приведенный краткий и фрагментарный исторический обзор результатов и тенденций в области ИИ, его компоненты можно проиллюстрировать графически (рис. 1, см. вторую сторону обложки). Современные модели и технологии ИИ можно разделить на три части. Одна из них, которая выше по тексту была названа коннекционизмом, представляет ту часть моделей и технологий ИИ, которую чаще называют нейросетями. В настоящее время ее основными предметами исследований являются модели структур и методы обучения глубоких нейросетей. Этот новый вид нейросетей отличается от своих предшественников не только числом слоев, но и более сложной технологической архитектурой, которая использует многослойную систему нелинейных фильтров для преобразования данных обучения, для поиска признаков в разных слоях и для их преобразования в иерархическую структуру с признаками различного уровня абстракции. Модель глубокого обучения нейросети способна использовать одновременно оба механизма обучения — с учителем и без учителя. Заметим, что успеху этой модели ИИ во многом способствовали успехи в создании высокоскоростных компьютеров.

К этим исследованиям примыкают (справа на рис. 1, см. вторую сторону обложки) исследования в области информатики мозга, нейробиологии и другие, которые иногда называют когнитивными науками [9]. К ним часто относят также и нейросетевые модели, однако с этим можно согласиться с большой натяжкой, поскольку кроме общего слова "нейросеть", используемого в них в разных смыслах, их мало что объединяет. По крайней мере, модель сети глубокого обучения появилась не в результате каких-то достижений в области изучения мозга человека (появление этой модели относят к 1980 г.), а в результате совершенствования нейросетевых механизмов обработки данных в области ИИ. Реально нейросети глубокого обучения имеют мало общего с реальными нейросетями головного мозга. Однако поскольку

концепция нейросети мотивировалась изначально как попытка моделировать эти механизмы, то отнесение модели глубокого обучения к когнитивным наукам не вызывает особого возражения ни в ИИ, ни в среде специалистов когнитивных наук.

К полярной в некотором смысле области ИИ как научного направления в информатике следует отнести вычислительный интеллект, который очень далек от когнитивных моделей и который акцентирует внимание на эффективной реализации вычислительных моделей ИИ с помощью программно-аппаратных реализаций и суперкомпьютеров. Действительно, использование высокоскоростных компьютеров и программно-аппаратных реализаций ИИ предоставляет новые технологические возможности по сравнению с вариантами программной реализации моделей ИИ на обычных компьютерах. Хорошо известно, что победы, одержанные шахматными программами и программами игры в Го над профессионалами, были бы невозможны без использования суперкомпьютеров, и эти достижения принято относить к достижениям ИИ. Следует также отметить перспективу суперкомпьютерных технологий в обработке больших объемов сырых данных, поскольку их последующая обработка для извлечения знаний и машинного обучения предъявляет уже значительно более слабые требования к мощности компьютера.

Однако основная область задач, моделей методов, алгоритмов, инструментов и технологий современного ИИ находится между двумя названными выше компонентами ИИ (рис. 1, см. вторую сторону обложки). Системы ИИ, которые относятся к этой области и которые охватывают большую часть того, что принято называть методами ИИ, часто называют также системами, основанными на знаниях. В среде специалистов уже относительно давно оба эти названия отождествляют, а сам термин "знания" чаще всего используется специалистами ИИ с момента его зарождения и по настоящее время. По-видимому, именно знания являются ключевым понятием ИИ и нуждается в отдельном обсуждении.

Знания, семантика знаний, семантические технологии

Знания как объект исследований, разработок и использования всегда присутствуют в при-

кладных системах и технологиях ИИ, в отличие от систем и технологий других типов. При этом *знания* составляют ядро любой интеллектуальной системы, и именно знания (их объем, корректность, полнота и др.) и используемые методы работы с ними определяют потенциальные возможности конкретной интеллектуальной системы. Вместе с тем термин "знания" является ключевым словом и при описании интеллекта человека. В работе [10] один из ее авторов, Д. А. Поспелов, наиболее авторитетный специалист ИИ в СССР и России, в разделе "Становление информатики в России" рассматривает ИИ как раздел информатики и характеризует его как "представление знаний, вывод на знаниях, обучение, экспертные системы и т. п." (стр. 8), и ИИ — это "технологии решения задач, опирающиеся на идею использования знаний о предметной области" (стр. 37), по сути, однозначно выделяя предмет исследований ИИ и его базовые задачи.

Это же, хотя и косвенно, но однозначно утверждается и в работе [11]: "...при определении искусственного интеллекта следует отталкиваться от определения естественного интеллекта, то есть "способности мозга человека решать интеллектуальные задачи путем приобретения, запоминания и целенаправленного преобразования знаний и использования этих знаний для управления средой". Заметим, что в этих высказываниях не говорится о том, что ИИ должен в чем-то повторять естественный интеллект. В них, как и в приведенном высказывании Дж. Маккарти, акцентируется внимание лишь на *сходстве задач*, решаемых человеком и программой ИИ, но не утверждается обязательное сходство методов их решения. И именно в этом смысле термин "искусственный интеллект" является метафорой, которая показалась создателям этого научного направления весьма удобной в качестве названия, но не более того, и эта метафора сразу была принята в сообществе специалистов.

Ключевая роль знаний в информационных технологиях ИИ состоит в том, что именно благодаря их использованию стало возможным эффективное решение многих вычислительных задач, которые являются задачами экспоненциальной сложности и для которых любое кратное увеличение производительности вычислительных машин не в состоянии гарантировать получение оптимального решения за разумное время. Заметим, что иногда

можно встретить утверждения о том, что большая часть достижений в области ИИ напрямую связана с ростом производительности компьютеров. Эту связь отрицать невозможно, но далеко не все проблемы ИИ могут быть успешно и эффективно решены только за счет этого фактора, а использование знаний совместно с ростом производительности компьютеров позволяет этого достичь. Хорошо известно, что человек успешно решает многие вычислительно сложные задачи с помощью когнитивных эвристик. Механизм принятия решений на основе правил является одним из самых распространенных механизмов решения задач ИИ. И этот механизм ИИ является аналогом когнитивных эвристик человека. Многие вычислительно сложные переборные задачи успешно решаются с использованием знаний и принципа ограниченной рациональности, который ориентирует исследователя на поиск "хороших" решений вместо оптимальных, но за разумное или заданное время.

Часто возникает вопрос о том, а почему по отношению к одному типу информации мы используем термин "данные", а по отношению к другому — "знания", и почему именно знания, а не данные, позволяют решать сложные задачи, которые метафорически называют интеллектуальными. Конечно, однозначную границу между этими типами информации провести вряд ли можно, однако семантические их модели, которые твердо вошли в обиход исследователей и разработчиков ИИ в последние годы, позволяют эту границу наметить. Появление семантических моделей знаний и данных — это настолько важный шаг в развитии ИИ, что их практическое использование следует трактовать как новый этап его развития, и об этом следует сказать особо.

Семантические вычисления — это область ИИ, которая имеет целью исследования и разработки компьютерных технологий для решения задач поиска, создания, формального представления, манипулирования и использования контента и доступных компьютерных ресурсов, а именно различных данных, тестовых документов, изображений, видео- и аудиоинформации, инструментальных средств, людей, устройств, агентов и т.д. в терминах ЕЯ [7, 12—16]. Основные задачи семантических вычислений в ИИ включают в себя:

— *семантический анализ* — вычисление смысла контента, представленного текстом, изо-

бражением, аудио- и видеоинформацией, анализ семантики контента социальных сетей, работу с контентом в семантическом стиле и др.;

— *семантическая интеграция знаний* и данных, например, для создания единого семантического информационного пространства на множестве распределенных баз данных, знаний и онтологий;

— *семантические интерфейсы* (пользовательские и машиночитаемые, средства взаимодействия роботов и человека);

— *семантические приложения* (поисковые машины, семантические веб-сервисы, базы знаний текстов, изображений, видео-, аудиоинформации и др.).

Работа со знаниями в терминах ЕЯ является фокусом семантических технологий. Основные решения в области семантических вычислений и семантических технологий строятся с помощью онтологических моделей знаний и данных. Теоретические основы онтологий, языковые средства их формального описания, а также семантические ресурсы и инструменты для их практического использования развиты в настоящее время достаточно хорошо [14—16], и они продолжают активно развиваться.

Как видно из материалов данного раздела, знания — это ключевое понятие ИИ, и работа со знаниями является отличительной чертой системы ИИ по отношению к компьютерным системам других классов. Это позволяет утверждать, что именно *знания* являются основным *объектом исследований* и разработок в области ИИ. Более того, анализ научной литературы в области ИИ показывает, что основные исследования и разработки в ИИ концентрируются вокруг трех проблем, и в фокусе каждой из них находятся различные аспекты технологии работы со знаниями, а именно:

- получение знаний,
- представление и преобразование знаний и
- использование знаний.

Рассмотрим кратко научное содержание этих проблем и покажем, что они охватывают практически все задачи, которые принято относить к ИИ.

Получение знаний

Для решения задач *получения знаний* привлекаются самые разнообразные источники данных и знаний. Для этих целей разработа-

ны разнообразные методы, алгоритмы и программные инструменты, известные из математики и математической статистики. Исследователями в области ИИ созданы свои специфические методы, алгоритмы и инструменты для решения задач извлечения знаний из различных источников. Это направление в ИИ обычно называют "инженерией знаний". К ним, например, относятся специфические методы и инструменты получения знаний напрямую от экспертов, а также из данных с помощью методов машинного обучения (англ. *Machine Learning*) или методов обнаружения зависимостей в данных (англ. *Data Mining*). Рисунок 2 (см. вторую сторону обложки) иллюстрирует основные источники данных и знаний, источники знаний о семантике понятий и текстов, а также типы инструментов, которые к настоящему времени доступны специалистам для решения задач инженерии знаний.

Важно отметить, что совместное использование методов, известных из математики, и методов инженерии знаний обычно настолько естественно и привычно, что многие исследователи, а особенно разработчики программного обеспечения автоматически причисляют их к методам машинного обучения ИИ. Яркими примерами такого отождествления "по привычке" являются многочисленные методы приближенной оптимизации на основе случайного поиска, например, генетические алгоритмы, алгоритмы случайного поиска на основе мета-эвристик, заимствованных у природы (муравьиные алгоритмы, пчелиные и другие алгоритмы из этой серии) и др. Строго говоря, сюда же следовало бы отнести и методы машинного обучения с подкреплением, а также методы оптимизации на основе случайного поиска, которые активно развивались вне задач ИИ и иногда задолго до инженерии знаний. Об этом часто забывают и студентам читают их в курсах инженерии знаний ИИ.

Однако некоторые варианты случайного поиска были созданы именно для машинного обучения по примерам, и их следует относить к ИИ. Заметим, что методы обучения нейросетей, например, методы глубокого обучения, являются методами случайного поиска с подкреплением, но именно для решения задач ИИ, и потому их правомерно относить к инженерии знаний.

Результатами задач инженерии знаний являются паттерны знаний либо с семантиче-

ской интерпретацией (например, в виде правил, предметные переменные которых являются понятиями онтологии), либо в чисто синтаксической форме, в которой такая интерпретация явно отсутствует. Последний вариант характерен для результатов обучения нейросетей. Заметим, что онтология сама по себе — это одна из форм знаний с явным представлением семантики, поэтому построение онтологий относится к получению знаний.

Отметим, что выше шла речь об описании знаний на концептуальном уровне. Их называют также концептуальными моделями знаний. Для их описания обычно используют различные средства естественных и/или формальных языков, куда относят также формулы, таблицы, графы, тексты и прочее. На этом уровне описания знания еще не готовы к использованию компьютерными программами, поскольку машинный язык сильно отличается от языков описания концептуальных моделей знаний. Исключение составляют разве что модели знаний, представленные в форме нейросети. Они не являются, строго говоря, моделями знаний концептуального уровня, поскольку уже представляются виде вычислительных структур в битовой форме.

Преобразование знаний и данных к формальной модели, ее трансляция на машинный язык — это задача следующего этапа работы со знаниями.

Представление и преобразование знаний и данных

Как уже отмечалось, концептуальная модель знаний не может быть использована компьютером напрямую, поскольку машинный язык — это язык бинарных последовательностей. Представление знаний концептуального уровня в виде структур, которые могут быть далее формально преобразованы к машиночитаемой форме, — это одна из задач второй группы типовых проблем ИИ. Выше она была названа проблемой *представления знаний*, причем под представлением знаний понимается их спецификация в терминах конкретных структур, описываемых на некотором формальном языке. Построенные структуры знаний и данных могут далее использоваться в качестве входа для программ, выполняющих их трансляцию в форму, понятную компьютеру. Несколькими упрощая, можно сказать, что задача

данного этапа — это преобразование знаний из формального представления, понятного человеку, в форму, понятную компьютеру. На этом этапе знания и данные, описанные, например, текстами на ЕЯ или представленные в другой форме, понятной человеку, преобразуются в машиночитаемую форму.

Ранее отмечалось, что в настоящее время в качестве модели описания знаний концептуального уровня обычно рассматривается модель онтологии. В ней понятиям *онтологии* соответствуют реальные или виртуальные объекты (классы) таксономии предметной области разных *уровней обобщения*. Каждый класс понятий (ему отвечает множество классов объектов реального или виртуального миров) описывается конкретной *структурой*, множеством *атрибутов*, а также непустым *множеством примеров* (в приложениях).

Такое представление знаний и данных принято называть семантическим представлением. Хорошо известно, что семантика любого термина ЕЯ и в том числе семантика понятия онтологии не может быть описана точно. Для нее могут быть определены только некоторые размытые границы. В *онтологии приложения* семантика понятия определяется множеством его *примеров*. При этом чем больше примеров понятия имеется в онтологии, тем точнее определена его семантика, так как каждый новый пример понятия уточняет (расширяет) его смысл, снижая тем самым его смысловую неопределенность.

Представление знаний в форме онтологии принято еще называть формализацией концептуализации. Действительно, онтология концептуального уровня в модели представления сначала описывается на некотором формальном языке, например, на *RDF*, *OWL* или на каком-то другом языке, но это пока форма, понятная человеку. После трансляции такое представление преобразуется в структуры данных и знаний, читаемые компьютером.

Человек предпочитает вводить знания и данные в компьютер в форме, понятной ему. В той же форме он предпочитает получать промежуточные и конечные результаты решения задачи. Но компьютер "понимает" только машиночитаемую форму данных и знаний. Поэтому на этапе представления знаний рассматриваются обе формы знаний и данных и их преобразование в обе стороны. Рисунок 3 (см. третью сторону обложки) иллюстрирует один из случаев использования, когда выполняются

преобразования знаний и данных из формы, понятной человеку, в форму, понятную компьютеру, и наоборот. Во всех этих преобразованиях используется модель представления знаний в онтологической форме.

Использование знаний

Обратимся к задаче использования знаний, т. е. к *технологиям* работы со знаниями, принятым в различных прикладных интеллектуальных системах. *Использование знаний* в ИИ — это применение конкретных технологий ИИ и инструментальных средств их программной поддержки. Технологии ИИ, например, многоагентные технологии, технологии глубокого обучения и т. д., и инструменты их программной поддержки сильно зависят от класса приложений. Именно на этом этапе дорожная карта НС должна различать классы приложений, такие как компьютерное зрение, многомодальные интерфейсы, автономные роботы и групповое управление в различных случаях, сценариях и миссиях использования, распределенные системы и сети класса интернета вещей и/или киберфизических систем, интеллектуальные сенсорные сети и "умные" облачные сервисы в различных приложениях, системы поддержки принятия решений (в производстве, на транспорте, для обеспечения безопасности в киберпространстве, финансовой сфере, биологии, фармацевтике и т. д.), рекомендательные системы, например, персональные рекомендательные системы в медицине, в управлении активами и т. д.

В качестве одного из классов задач использования знаний следует также рассматривать задачи обмена информацией между компонентами (распределенного) приложения, реализуемые коммуникационными технологиями, в которых содержание сообщений описано на языках представления знаний.

Обсуждение: важные задачи дорожной карты

Представленная факторизация базовых задач ИИ на задачи получения, представления и использования знаний позволяет структурировать работы по созданию "комплекса технологических решений", запланированных в НС.

В настоящее время теория и технология ИИ достигли высокого уровня зрелости, и они по достоинству оценены индустрией. За

шестьдесят с лишним лет развития наука об управлении на основе знаний уже преодолела этап начальной эйфории, когда специалисты всерьез говорили о возможности быстрого создания ИИ как альтернативы или даже как расширения естественного интеллекта. Сейчас это направление ИИ остается областью профессиональной деятельности нейробиологов, специалистов в области философии сознания и информатики мозга (см. рис. 1 на второй стороне обложки). Он остался также областью профессиональной деятельности специалистов в области когнитивных наук, которые изучают когнитивные процессы головного мозга человека в интересах познания, моделирования и использования получаемых знаний.

ИИ как направление в информатике болезненно и с большой потерей времени преодолел этап всеобщей уверенности во всемогущих формальных логических моделях и логического вывода как универсального средства решения проблем ИИ. Сейчас уже мало тех, кто использует Пролог и механизмы принятия решений, построенные на его основе. В истории развития ИИ определенные достижения связаны с периодом активного развития идей и технологий экспертных систем как замкнутых систем принятия решений, построенных на экспертных знаниях. Однако все это уже отошло в прошлое.

В настоящее время палитра актуальных научных исследований и прикладных разработок в области ИИ достаточно обширна и разнообразна. Однако ее наиболее важные, наиболее продуктивные и наиболее проблемные направления, как и на начальных этапах развития ИИ и интеллектуальных технологий, относятся, прежде всего, к *получению знаний*. Именно качество и полнота знаний, используемых той или иной прикладной интеллектуальной системой, практически однозначно определяют ее возможности. Тематика получения знаний остается актуальной уже более 40 лет. В разные периоды она концентрировалась вокруг разных источников, методологий и алгоритмов извлечения знаний и программных средств их инструментальной поддержки. Сейчас в этой по-прежнему ведущей и наиболее трудной области ИИ преобладают два направления. Одно — это семантическая обработка больших данных для *извлечения знаний* и построения механизмов принятия решений, а второе — это глубокое обучение нейросетевых структур принятия решений на основе тех же данных. Эти два во

многом альтернативных подхода к решению одной и той же проблемы, тем не менее, дополняют друг друга.

Извлечение знаний из больших данных имеет целью построение моделей данных и знаний, в которых семантика представлена на ЕЯ. Методология получения знаний в такой форме использует строгие математические постановки задач, методы и алгоритмы их решения. Эти методы принято называть символьными, хотя понятие "символ" в современных языках представления и использования знаний значительно отличается от аналогичного понятия ИИ, скажем, 30 лет тому назад. Отличается оно, прежде всего, переходом от чисто синтаксической формы символьных языков к семантической. Если 30 лет тому назад основные механизмы формального представления знаний концентрировались вокруг языков формальных логических исчислений, то сейчас эти модели ушли в прошлое ввиду слабой выразительности и вычислительной неэффективности. Настоящее время — это время семантики, семантических вычислений, семантических технологий и семантических приложений [7], в которых каждая строка символов (переменная или константа) имеет четко заданную и формально "вычисляемую" семантику в терминах ЕЯ. Семантические вычисления в ИИ — это сейчас один из самых заметных и долговременных трендов в области ИТ, а семантические технологии должны стать составляющей общего "комплекса технологических решений" НС.

В отличие от этого нейросетевые модели и знания, представленные в нейросетях, пока остаются чисто синтаксическими. Глубокое обучение есть управляемый механизм случайного поиска с подкреплением, и не стоит строить иллюзий относительно его всемогущества. Интуитивно этот подход является попыткой воспроизведения механизмов обучения принятия решений, которые реализуются в когнитивной модели мозга человека. Но пока достоверных знаний об этих механизмах нет, а потому не вызывают доверия утверждения о том, что эти механизмы аналогичны механизмам естественного интеллекта. Тем не менее, успехи современных нейросетевых моделей принятия решений очевидны и значимы для практики. Они позволили решить ряд вычислительно трудных задач обучения структур принятия решений на основе размеченных данных.

Но эти успехи, как и возможности современных механизмов глубокого обучения, силь-

но преувеличены теми, кто религиозно верит в них. Главный недостаток технологии глубокого обучения — это катастрофические требования к объему обучающих данных, что свойственно всем механизмам случайного поиска. И хотя эти требования могут быть частично ослаблены за счет механизмов предобработки обучающих данных (например, за счет механизмов нелинейной фильтрации), но они пока все равно остаются высокими.

Высокие требования к объему обучающих данных для глубокого обучения в последнее время вызвали определенный кризис в этой области, хотя большинство специалистов закрывают на это глаза. Эти требования стимулировали появление средств инжиниринга обучающих данных с помощью математического моделирования. Но это всего лишь полумера, ведущая только к временному ослаблению остроты проблемы. По мере усложнения объектов и систем, для работы с которыми используются механизмы глубокого обучения, потребности в объемах размеченных данных будут расти, и проблема обязательно обострится снова. Очевидно, что нейросети головного мозга человека опираются в значительной мере на семантику и на контекст принятия решений, а потому пути для преодоления проблем дефицита размеченных обучающих данных следует искать также в их обогащении семантикой ЕЯ.

В области моделей представления знаний основной проблемой является автоматизация построения онтологии, в частности, онтологии данных. Это направление уже достаточно долго остается одним из ключевых в области ИИ, и в этом направлении уже имеется значительный прогресс по созданию семантических ресурсов и типовых онтологий, которые предоставляет семантический веб и семантические ресурсы проекта *Linked Data Web* [15, 17], о чем ранее уже шла речь. Однако существующие многочисленные инструменты проекта *Linked Data Web* и используемые в них семантические ресурсы пока еще не обладают нужной точностью по семантическому анализу данных при выявлении понятий и их структуризации.

Другая группа проблем представления знаний и семантических вычислений, которая частично может быть отнесена и к множеству проблем использования знаний, связана с решением задач трансформации знаний и данных из человекопонятной формы в форму,

понятную компьютеру, и наоборот (см. пример на рис. 3, см. третью сторону обложки). В настоящее время, к сожалению, отсутствуют *эффективные* механизмы, пригодные для выполнения таких преобразований знаний и данных с большими объемами баз знаний. Однако имеются новые разработки в области графовых баз данных, реализованных новыми системами управления базами данных, например, *Neo4j* и *OrientDB* с большим потенциалом для задач семантического представления и использования знаний.

Что касается проблем использования знаний в прикладных системах ИИ, то здесь можно констатировать наибольшее число острых и весьма сложных проблем, требующих совместных усилий научного сообщества и бизнеса. В этой области тенденции определяются новыми приложениями, в частности, приложениями класса интернета вещей и киберфизических систем. Будущее этих систем принято связывать с их реализацией в виде экосистем умных сервисов. Центральным компонентом таких реализаций является (распределенная) цифровая платформа, которая играет роль программно-коммуникационной инфраструктуры, трансформирующей множество ее гетерогенных компонентов (распределенных приложений, сенсоров, облачных ресурсов и сервисов, разделяемых ресурсов и сервисов, которые реализуются цифровой платформой и т. д.) в единую "систему систем" [18–20].

Кратко задачи экосистемы умных сервисов, интеллектуального ядра процессов координации и управления, должны состоять в том, чтобы (рис. 4, см. третью сторону обложки):

- "погрузить" все компоненты в единое коммуникационное, информационное и семантическое пространство знаний и данных и обеспечить интерфейсы доступа к ним со стороны программ и пользователей;
- обеспечить совместимость компонентов экосистемы по форматам данных и знаний при решении задач кооперации и координации поведения;
- поддерживать решение задач распределения, планирования и оперативного управления общими ресурсами экосистемы в реальном времени;
- обеспечить узлы сети компонентов экосистемы онлайн-доступом к облачным ресурсам и сервисам и к внешним источникам информации и

- обеспечить накопление и хранение данных, генерируемых приложениями, для машинного обучения в целях повышения качества их работы.

Одна из особенностей современных приложений класса интернета вещей и киберфизических систем состоит в том, что в них обычно объектом управления является групповое поведение множества автономных объектов, и это важный новый класс объектов управления. Управление групповым поведением в этом классе объектов называют *групповым управлением*. В ближайшее время следует ожидать вирусного распространения приложений, в которых требуется решать задачи группового управления. Эффективные решения в этой области могут быть построены на основе сетей агентов и агентских технологий, важного компонента в "комплексе технологических решений" ИС.

Заключение

Ясное понимание сути проблем ИИ и интеллектуальных технологий должно способствовать ускоренному внедрению радикально новых ИТ, позволяющих решать научные и технические задачи современной цифровой эры. В работе показана ключевая роль знаний в ИИ и в интеллектуальных ИТ. Показано, что ИИ следует рассматривать как научную дисциплину, объектом изучения в которой являются знания, а методологическую основу составляют модели, алгоритмы и программные инструменты извлечения, представления и использования знаний в приложениях.

В работе проанализировано существо базовых задач ИИ и сделан вывод о том, что дорожная карта развития ИИ и интеллектуальных технологий для создания "комплекса технологических решений" ИИ может быть структурирована в соответствии с этими тремя базовыми проблемами ИИ. В контексте этих задач перечислены проблемы и основные тренды их эволюции, существенные для долговременной стратегии развития ИИ и интеллектуальных технологий в различных приложениях, в том числе в цифровой экономике.

Список литературы

1. Указ Президента РФ "О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации" от 10 октября 2019 г.

№ 490. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/news/61785>. (дата обращения 24.01.2020)

2. **Каляев И., Заборовский В.** Искусственный интеллект. От метафоры к техническим решениям // Control Engineering. Россия. Октябрь 2019. С. 78—83.

3. **Искусственный интеллект** — Википедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Искусственный_интеллект (дата обращения 24.01.2020).

4. **Юсупов Р. М.** К семидесятилетию отечественной информатики // Труды СПИИРАН. 2019. Т. 18, № 1. С. 5—29.

5. **Zhong N., Jeffrey M., Bradshaw J. M., Liu J., Taylor J. G.** Brain Informatics // IEEE Intelligent Systems, September/October. P. 16—20.

6. **Sheu P., Yu H., Ramamoorthy C. V., Joshi A., Zadeh L. A.** (eds.) Semantic Computing // IEEE. Wiley, 2010. 552 p.

7. **Horpe T., Humm B., Reibold A.** (eds.) Semantic Applications. Berlin, Heidelberg, Springer Vieweg, 2018.

8. **Goodfellow I., Bengio Y., Courville A.** Deep Learning. An MIT Press book. URL: <http://www.deeplearningbook.org> (дата обращения 24.01.2020).

9. **Станкевич Л. А.** Когнитивные системы и роботы. СПб: Политех-Пресс, 2019. 630 с.

10. **Очерки истории информатики в России /** Ред.-сост. Д. А. Поспелов, Я. И. Фет. Научно-издательский центр ОИГГМ СО РАН, 1998.

11. **Каляев И. А.** Гонка за цифровым призраком. Есть ли у России шанс поучаствовать в борьбе за первенство в разработке ИИ // Огонек. № 24 (5569). URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4003879> (дата обращения 24.01.2020).

12. **Bartussek W., Bense H., Horpe T.** et al. Introduction to Semantic Applications // Semantic Applications. Methodology, Technology, Corporate Use. Springer Nature, 2018. P. 1—13.

13. **Bizer C., Lehmann J., Kobilarov G.** et al. DBpedia — A crystallization point for the Web of Data // Web Semantics: Science, Services and Agents on WWW. 2009. Vol. 7. P. 154—165.

14. **Flisar J., Podgorelec V.** Improving Short Text Classification using Information from DBpedia Ontology // Fundamenta Informaticae 2018. Vol. XXI. IOS Press. P. 1—35.

15. **Heath T., Bizer C.** Linked Data: Evolving the Web Into a Global Data Space. Morgan & Claypool Publishers, 2011.

16. **Городецкий В. И., Тушканова О. Н.** Семантические технологии для семантических вычислений. 1. Базовые компоненты // Искусственный интеллект и принятие решений. 2018. № 4. С. 61—71.

17. **Linked Data.** URL: <http://linkeddata.org> (дата обращения 24.01.2020).

18. **Городецкий В. И., Ларюхин В. Б., Скобелев П. О.** Концептуальная модель цифровой платформы для киберфизического управления предприятием. Часть 1. Цифровая платформа и цифровая экосистема // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20, № 6. С. 323—332.

19. **Городецкий В. И., Ларюхин В. Б., Скобелев П. О.** Концептуальная модель цифровой платформы для киберфизического управления современным предприятием. Часть 2. Цифровые сервисы // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20, № 7. С. 387—397.

20. **Gorodetsky V., Larukchin V., Skobelev P.** Conceptual Model of Digital Platform for Enterprises of Industry 5.0 // In Proceedings of the International Conference on Intelligent Distributed Computing. Lecture Notes in Computer Science. St. Petersburg, October 6—7, 2019. Springer, 2019.

Artificial Intelligence: Metaphor, Science and Information Technology

V. I. Gorodetsky, vladim.gorodetsky@gmail.com,

St. Petersburg State Electro-technical University (LETI) St. Petersburg, 197376, Russian Federation,

R. M. Yusupov, yusupov@iias.spb.su,

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS, St. Petersburg, 199178, Russian Federation

Corresponding author: **Gorodetsky Vladimir I.**, Ph.D. St. Petersburg State Electro-technical University (LETI), 197376, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: vladim.gorodetsky@gmail.com

Accepted on January 27, 2020

Abstract

To the present days, the scientific direction of computer science metaphorically called "Artificial Intelligence" (AI) as well as corresponding information technologies is becoming of strategic value as the theoretical and the technological basis of digital economy of the 21-th century. The leading economies of the world invest huge money in R&D of AI area. In many countries, e.g. in the USA and Europe the standardization effort in AI scope are initiated. In Russia, the President issued a decree "On development of artificial Intelligence in the Russian Federation" dated 10 October 2019. One must acknowledge, however, that up to the current days there is no common opinion, among AI scientists and engineers, on what is the research subject of AI, which are its R&D goals, scientific contents, methodology and technologies. In the paper, Artificial Intelligence is considered as a scientific discipline that is a section of Computer Science. In it, the knowledge acts as the main research subject and its scientific contents is composed of methodologies, methods and algorithms of the three AI subsections those are knowledge acquisition, knowledge representation and knowledge usage for decision making. This point of view is justified in the paper by analysis of AI historical issues, composition of its scientific topics and technologies. The aforementioned analysis is underway with regard to the basic R&D problems that should be in the focus of the AI roadmap of the Russian scientific and industry communities in context of the Presidential decree on the strategy of the development of Artificial Intelligence in Russian Federation.

Keywords: Artificial Intelligence, Computer Science, knowledge, knowledge acquisition, knowledge representation, knowledge usage, decision making

For citation:

Gorodetsky V. I., Yusupov R. M. Artificial Intelligence: Metaphor, Science and Information Technology, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 5, pp. 282–293.

DOI: 10.17587/mau.21.282-293

References

1. **Presidential** Decree of the Russian Federation No 490 dated 10 October 2019 "On development of artificial Intelligence in the Russian Federation", available at: <http://www.kremlin.ru/acts/news/61785> (accessed on 24.01.2020) (in Russian).
2. **Kaliayev I., Zaborovsky V.** Artificial Intelligence: From metaphor to technical solutions, *Control Engineering*, Russia, October 2019, pp. 78–83 (in Russian).
3. **Artificial Intelligence** — Wikipedia, available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Artificial_Intelligence (accessed on 24.01.2020) (in Russian).
4. **Yusupov R. M.** Towards 70-th anniversary of computer science, *Transactions of SPIIRAS*, 2019, vol. 18, no. 1, pp. 5–29 (in Russian).
5. **Zhong N., Jeffrey M., Bradshaw J. M., Liu J., Taylor J. G.** Brain Informatics, *IEEE Intelligent Systems*, September/October, pp. 16–20.
6. **Sheu P., Yu H., Ramamoorthy C. V., Joshi A., Zadeh L. A.** (eds.) Semantic Computing, *IEEE/Wiley*, 2010, 552 p.
7. **Hoppe T., Humm B., Reibold A.** (eds) Semantic Applications. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2018.
8. **Goodfellow I., Bengio Y., Courville A.** Deep Learning, MIT Press, available at: <http://www.deeplearningbook.org> (accessed on 24.01.2020).
9. **Stankevich L. A.** Cognitive systems and robots, St. Petersburg, Polytechnic Press, 2019, 630 p. (in Russian).
10. **Pospelov D. A., Fet Ya. I.** Essays of informatics history in Russia, Scientific Publishing Center OIGGV SO RAN, Novosibirsk, 1998 (in Russian).
11. **Kaliayev I. A.** Race for digital ghost. Does Russia have a chance to participate in competition to win in Artificial Intelligence?, *Ogoniok*, no. 24 (5569), 24.06.2019, available at: <https://www.kommersant.ru/doc/4003879> (accessed on 24.01.2020) (in Russian).
12. **Bartussek W., Bense H., Hoppe T. et al.** Introduction to Semantic Applications, In T. Hoppe, B. Humm, A. Reibold (Eds.). Semantic Applications. Methodology, Technology, Corporate Use, Springer Nature, 2018, pp. 1–13.
13. **Bizer C., Lehmann J., Kobilarov G., Auer S., Becker C., Cyganiak R., Hellmann S.** DBpedia — A crystallization point for the Web of Data, *Web Semantics: Science, Services and Agents on WWW*, 2009, 7, Elsevier, pp. 154–165.
14. **Flisar J., Podgorelec V.** Improving Short Text Classification using Information from DBpedia Ontology, *Fundamenta Informaticae* 2018, XXI, IOS Press, pp. 1–35.
15. **Heath T., Bizer C.** Linked Data: Evolving the Web Into a Global Data Space, Morgan & Claypool Publishers, 2011.
16. **Gorodetsky V. I., Tushkanova O. N.** Semantic technologies for semantic computing. Part 1. The basic components of semantic technologies, *Artificial Intelligence and Decision making*, 2018, no. 4, pp. 61–71 (in Russian).
17. **Linked Data**, available at: <http://linkeddata.org> (дата обращения 24.01.2020).
18. **Gorodetsky V. I., Lariukhin V. B., Skobelev P. O.** Conceptual model of a digital platform for cyber-physical management of a modern enterprises/ Part 1. Digital platform and digital ecosystem, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 6, pp. 323–332 (in Russian).
19. **Gorodetsky V. I., Lariukhin V. B., Skobelev P. O.** Conceptual model of a digital platform for cyber-physical management of enterprise. Part 2. Digital services, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, vol. 20, 2019, no. 7, pp. 387–397 (in Russian).
20. **Gorodetsky V., Larukhin V., Skobelev P.** Conceptual Model of Digital Platform for Enterprises of Industry 5.0, *Proceedings of the International Conference on Intelligent Distributed Computing, Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 2019, St. Petersburg, October 6–7, 2019.

V. N. Belopukhov, Cand. of Tech. Sc., bvnsam@mail.ru, **S. Yu. Borovik**, Dr. of Tech. Sc., borovik@iccs.ru,
P. E. Podlipnov, pepodlypnov@yandex.ru, **Yu. N. Sekisov**, Dr. of Tech. Sc., sekisov@iccs.ru,
O. P. Skobelev, Dr. of Tech. Sc., iccs@iccs.ru,
Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences,
Samara, 443020, Russian Federation

Corresponding author: **Borovik Sergei Yu.**, Dr. of Tech. Sc.,
Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences,
Samara, Russian Federation, e-mail: borovik@iccs.ru

Accepted on January 20, 2020

System for Measuring of Radial Clearances in Gas-Turbine Engine with Self-Compensation of Temperature Effects on the Sensor

Abstract

The paper presents the description of developed hardware, algorithms and software of the system for measuring of radial clearances between stator and blade tips in the compressor of gas-turbine engine. The measuring system implements the method with self-compensation of temperature effects on the eddy-current single-coil sensor with a sensitive element in the form of a conductor segment. Due to the self-compensation the number of used sensors and related mounting holes in the power plant stator was reduced. The core operations of the self-compensation are realized in real time on hardware-and-software level. This makes it possible to use the system for the detection of dangerous states of gas-turbine engines during power plants operation. The previously unexplored phenomenon of "not-complete compensation" of temperature effects is considered. The phenomenon is related to the special features of the conversion of the single-coil eddy-current sensor's informative parameter in the measuring circuit. It manifests in the difference of conversion functions of the system's measuring channels under normal and nominal temperatures. The paper provides the way of the effect elimination by means of program correction. The results of experimental researches of the working model of the measuring system are given. They characterize the metrological appropriateness and efficiency of the system. The experimentally obtained calibration characteristic approximated by polynomial function was used to determine the systematic part of the error as a difference between the given and the calculated radial clearance. The random error was evaluated by the deviation of measured codes from an average value in the sample that was obtained at the specified value of radial clearance for the fixed blade's position relatively to the sensor's sensitive element. The efficiency of the working model was evaluated on the laboratory equipment during the rotation of the electrically driven compressor wheel. The quantitative estimates of speed and accuracy of the working model of the measuring system were obtained during experimental researches. They confirmed the possibility of using the system for the detection of dangerous states of gas-turbine engines applied in the electrical power industry.

Keywords: gas-turbine engine, radial clearances, measuring system, hardware, algorithm and software, self-compensation of temperature effects, real-time processing, detection of dangerous states, systematic and random errors, efficiency

For citation:

Belopukhov V. N., Borovik S. Yu., Podlipnov P. E., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P. System for Measuring of Radial Clearances in Gas-Turbine Engine with Self-Compensation of Temperature Effects on the Sensor, *Mekhatronica, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 5, pp. 294–303.

DOI: 10.17587/mau.21.294-303

УДК 681.518.3

DOI: 10.17587/mau.21.294-303

В. Н. Белопухов, канд. техн. наук, bvnsam@mail.ru, **С. Ю. Боровик**, д-р техн. наук, borovik@iccs.ru,
П. Е. Подлипнов, pepodlypnov@yandex.ru, **Ю. Н. Секисов**, д-р техн. наук, sekisov@iccs.ru,
О. П. Скобелев, д-р техн. наук, iccs@iccs.ru,

Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук —
обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Самарского федерального исследовательского центра Российской академии наук, г. Самара, Россия

Система измерения радиальных зазоров в газотурбинном двигателе с самокомпенсацией температурных воздействий на датчик

Приводится описание разработанных технических средств, алгоритмов функционирования и программного обеспечения системы измерения радиальных зазоров между статорной оболочкой и торцами лопаток рабочего колеса компрессора газотурбинного двигателя, в которой реализован метод измерения с самокомпенсацией температурных воздействий на одновитковый вихрековый датчик с чувствительным элементом в виде отрезка проводника. Благодаря применению механизма самокомпенсации удалось минимизировать число используемых датчиков и соответствующих установочных отверстий в статорной оболочке силовой установки. Основные операции, предусмотренные самокомпенсацией, осуществляются в реальном времени на аппаратно-программном уровне. Это открывает возможность применения системы для диагностики опасных состояний газотурбинных двигателей в процессе эксплуатации силовых установок. Рассматривается ранее не изученный эффект "недокомпенсации" температурных воздействий. Эффект связан с особенностями преобразования информативного параметра одновиткового вихрекового датчика в измерительной цепи и проявляется в несовпадении функций преобразования измерительных каналов системы при нормальной и номинальной температурах. В статье предлагается способ устранения влияния указанного эффекта путем программной коррекции. Приводятся результаты экспериментальных исследований действующего макета системы измерения, характеризующие его метрологическую состоятельность и работоспособность. Для определения систематической составляющей погрешности действующего макета системы как разности заданного и вычисленного радиального зазора использовалась экспериментально снятая градуировочная характеристика, аппроксимированная полиномиальной функцией. Случайная погрешность оценивалась по отклонениям кодов от средних значений в выборке для фиксированной позиции лопатки относительно чувствительного элемента датчика при заданной величине радиального зазора. Оценка работоспособности действующего макета производилась на специализированной лабораторной установке в процессе вращения рабочего колеса реального компрессора от электропривода. В ходе экспериментов были получены количественные оценки быстродействия и точности разработанного макетного образца, подтверждающие возможность использования подобного рода систем измерения для диагностики опасных состояний газотурбинных двигателей, применяемых в энергетике.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, радиальные зазоры, система измерения, технические средства, алгоритмическое и программное обеспечение, самокомпенсация температурных воздействий, обработка в реальном времени, диагностика опасных состояний, систематические и случайные погрешности, работоспособность

Introduction

According to [1, 2], the main indicators of the reliability and cost-effectiveness of gas turbine engines (GTE) used in transportation vehicles, electrical power systems, and gas transmission are depends on the radial clearances (RC) between the stator and the blade tips of the rotor wheel (RW) of the compressor and turbine. It is obvious that this dependence is the cause of multi-year interest of GTE developers for measuring RC and using the results of such measurements in control and diagnostic systems of GTE [3–6].

There are lots of RC measurement methods based on different physical principles [7, 8]. But their implementation is limited to the harsh conditions in the gas-air-duct, such as those relating to the temperature which reaches 600 °C in the compressor and 1000 °C in GTE turbine.

At the same time, RC measurement systems using single-coil eddy-current sensors (SCECS) with a sensitive element (SE) in the form of a conductor segment have been successfully tested in bench tests of GTE. The sensitive element of the sensor is connected through noninductive conductors to the volume coil of a matching transformer (MT); the equivalent inductance of the primary winding of

this transformer is an informative parameter which depends on the RC. The SE as well as the other structural components of the SCECS (current conductors and the volume coil) is made of the same heat-resistant alloys as blades. The SE is inserted through a mounting hole directly into the wheel space, where it interacts with the blade tips. RC changes are converted to changes in the equivalent inductance of the primary winding of the MT. The MT of the SCECS is located outside the stator shell of the GTE under favorable temperature conditions [9–11].

The temperature effects on the SCECS components in RC measurement systems are reduced by means of additional witness SCECS, which SE is inserted through an additional mounting hole into the wheel space so that the temperature conditions are identical to the conditions of the SE of the working SCECS and there is no electromagnetic interaction with the blade tips. The witness SCECS is connected to the general measuring circuit (MC) with the working SCECS, where it performs compensation functions. This method was widely used in experimental studies of gas turbine engines under bench conditions [9–11]. However, the use of additional SCECS (and additional mounting holes) in the normal operation of GTE is extremely limited. There are also difficulties with selection of a pair of SCECS with identical

parameters associated with the existing manufacturing technology of the sensors.

The RC measurement method described in [12] does not require using an additional witness SCECS because of the fixation of extreme values of the equivalent inductance of the MT primary winding of the SCECS, which depends on the RC and temperature, when a controlled blade passes by the SE (position RWI) and only on temperature when a blade-to-blade gap passes by the SE (position RWII), with the calculation of the difference of the measured values, which is determined only by the RC. Using models of the electromagnetic interaction (EMI) of the SE with the compressor blade tip, families of conversion functions (CF) of SCECS and MC were obtained [13] as well as the influence functions (IF) of a number of the disturbing factors (DF) on the difference of the extreme code values [14–16]. Moreover, the structures and the operation algorithms of the system for RC measuring with self-compensation of temperature effects on SCECS are considered in [17].

But the above-mentioned papers [12–17] do not contain any information about experimental studies that confirm operability and effectiveness of the RC measurement method with self-compensation of temperature effects on the sensor and illuminate the ways in which they can be realized. The paper is written to eliminate existing gaps. For this, we give a description of the developed hardware, algorithms and software of the system for RC measuring with self-compensation of temperature effects on SCECS. The previously unexplored phenomenon of "not-complete compensation" of temperature effects and the way of its elimination are considered. The results of the experimental studies of the working model of the measuring system are given. They characterize the metrological appropriateness and efficiency of the system. The specific example of the application of the developed system for the detection of dangerous states of GTE compressor applied in the electrical power industry is given. The quantitative estimates of the speed and the accuracy of the working model of measuring system were obtained during the studies and are given too.

System's hardware, algorithms and software

The system consists of both standard and non-standard technical facilities (Fig. 1).

The non-standard facilities include SCECS with two thermocouples (TC₁ & TC₂) intended for addi-

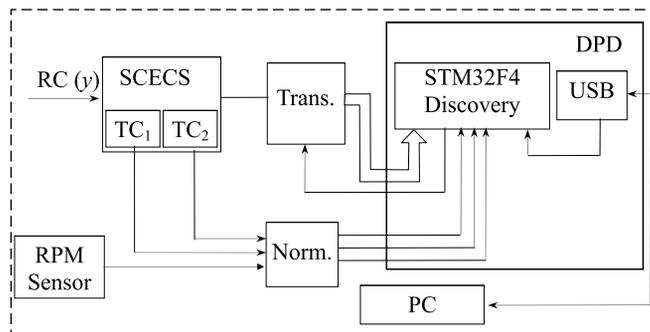


Fig. 1. Technical facilities of RC measurement system

tional temperature correction¹, transducer (Trans.) which is the MC, containing differential scheme on the input with SCECS and its imitator, a "current-to-voltage" converter, a scaling amplifier and ten-unit ADC on the exit [13]. The transducer is plugged in the communication line between SCECS and the device for preprocessing of digital data (DPD).

The standard facilities are composed of RPM sensor, normalizer (Norm.) of the signals of TC and RPM sensor; the standard block STM32F4Discovery on the base of microcontroller STM32F407VGT6B [18].

DPD is linked with PC through USB-channel. The voltages corresponding to signals of TC₁ and TC₂ come from output of the normalizer to the analog input of ADC plugged in microcontroller and the normalized sequence of pulse signals from RPM sensor comes to the discrete input of microcontroller for measuring of RW rotation period.

According to [19, 20] the preliminary digital data processing (DPD, Fig. 1) includes the set of operations which on account to their content, importance, goals and tasks separately or in combination (in algorithms) can be presented as three methods for determination of:

- averaged extreme code values of blade-to-blade gaps \bar{C}_{II}^{ext} ;
- extreme values of the difference of averaged codes of blade-to-blade gaps and codes corresponding to each blade during one period of RW rotation ΔC^{ext} ;
- averaged extreme value of the difference of codes for several (N) periods of RW rotation corresponding to each blade $\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta C_i^{ext} \right)$.

¹According to the method in [7], the thermocouples TC₁ & TC₂ provide a higher accuracy of the temperature measuring in GTE flow section. This temperature is used during data processing in the measurement system and allows to reduce the temperature effect on the controlled and adjacent blades and as the result – to increase the reliability of information about RC.

The first method for determination of the code \bar{C}_{II}^{ext} and the algorithm, corresponding to it, are implemented at one of the initial periods of RW rotation. They include a number of operations related to the construction of the statistical distribution (histogram) of ADC codes and fixation of the most probable code value \bar{C}_{II}^{ext} found on the basis of the histogram. This value of code is used on the next period of RW rotation².

The second method involves a combination of several algorithms during one period of RW rotation and their implementation in real time in microcontroller. The algorithms are:

- calculation of codes difference $\Delta C(t) = \bar{C}_{II}^{ext} - C(t)$, where \bar{C}_{II}^{ext} is determined on the previous period of RW rotation and $C(t)$ are current code values from ADC output;
- searching for extreme code values ΔC^{ext} corresponding to each blade by a brute-force approach;
- redefinition of averaged extreme code values \bar{C}_{II}^{ext} on the current period of RW rotation for use them on the next period.

The third method and the algorithm, corresponding to it, are intended to reduce a random component of the measuring error through the averaging of the extreme values of the difference of codes ΔC^{ext} corresponding to each blade during a fixed number of completed periods of RW rotation.

Listed in the methods for preliminary data processing algorithms are implemented within the existing resources (hardware and software) of one microcontroller: timer, ADC, floating point unit and interrupt controller. The timer is used in "capture" mode for measuring of the period of RW rotation by signals of RPM sensor. The signals case interruption after each period of RW rotation. These interruptions are used for synchronization of the algorithms corresponding to each method.

The operations of codes processing corresponding to each blade during one period of RW rotation are presented in the methods and the implementing algorithms. Such operations are carried out by interrupts with other priority. The initial signals for the interrupts are produced adaptively after the fact when each blade passes by the SE SCEDC and the extreme difference code ΔC^{ext} is firmly fixed. The operation of accumulation of the averaging sums of the extreme difference of codes $\left(\sum_{i=1}^N \Delta C_i^{ext} \right)$ for

²The most probable code value \bar{C}_{II}^{ext} is taken for its averaged value.

several (N) periods of RW rotation corresponding to each blade is carried out in this interruption handler. So, the operations intended by methods and relevant algorithms are executed comprehensively and in real time. Thanks to periodicity of the RW rotation process all blades pass by the SE SCEDC in turn on each period of the wheel rotation. This provides easy access to the averaged extreme code values of the complete ensemble of the RW blades during several periods of the wheel rotation in real time. The resulting array of averaged codes relevant to the blades is transferred to the upper level in PC.

The specified in the working model of the measurement system PC (Fig. 1) is used for RC calculating in the same way as it was done in the measurement systems for experimental studies of GTE under bench conditions [9, 10].

Study results

The main attention is given to the experimental studies of the working model of the RC measurement system. The studies include the definition of the meteorological parameters of the measurement system and the evaluation of its efficiency. At the same time the section starts with examination of vital and unexplored phenomenon of "not-complete compensation" of temperature effects on the SCECS. The phenomenon manifests in the difference of CF (or calibration characteristics) of the system's measuring channels in the form of the dependencies ΔC^{ext} on RC under normal and nominal temperatures. The quantitative estimates of the speed of the working model of the measurement system and the possibility of the random error reducing on several periods of the RW rotation are considered in the final part of the section.

Temperature effects on the CF of RC measurement system and the way to reduce it. Even with the working model of the RC measurement system the calibration device for experimental research of temperature effects is needed. It should provide guaranteed accuracy for RC settings ($\leq 0,01$ mm) within a specified range 0,5—2,5 mm under normal (20 °C) and nominal (620 °C) temperatures in compressor's gas-air duct.

In the absence of applicable calibration device for experimental research of temperature effects the well-known model of the EMI of the SE with turbine blade's tips can be used [11]. The model should be adapted to the blade used in GTE compressors. The similar model was used in [12—16], where the

required for simulating data are given (including the reference frame *OXYZ* which origin (point *O*) is located in the center of SE, the *X* axis is directed along the RW axis, the *Y* axis is directed radially (the RC value is characterized by the *y* coordinate) and the *Z* axis is in the direction of RW rotation).

The simulation results make it possible to determine the CF of SCECS – the dependences of extreme values of the inductance of the MT primary winding on RC (*y*) under the normal temperature ($L_{MT}^{ext}(y)$); the value of $L_{MT}^{ext}|_{y \rightarrow \infty}$ ($L_{MT\infty}^{ext} = L_0$), and the changes of $\Delta L_y = L_0 - L_{MT}^{ext}(y)$ [13].

It should be noted that changes of the equivalent inductance of the primary winding of the MT due to the temperature changes up to 600 °C were determined experimentally for the three SCECS samples of one type and size. The SE of SCECS were placed in hot air steam and the volume coils of MT were cooled by the water. The inductance changes (ΔL_Θ) averaged to $0,03L_0$ (3 %) under temperature changes up to 600 °C. This led to obtaining CF at a temperature 620 °C [13].

The detailed description of the MC³ is given in [13]. The same literature source presents the CF of MC in the form of dependences of codes C_{II}^{ext} and C_I^{ext} in positions RWI and RWII on the inductance changes ΔL_y and ΔL_Θ :

$$C_{II}^{ext} = K_S K_C E \left(\frac{L_a}{L_0} + \frac{\Delta L_\Theta}{L_0} \right) \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta L_\Theta}{L_0} \right) \left(1 - \frac{L_a}{L_0} \right)}; \quad (1)$$

$$C_I^{ext} = K_S K_C E \left(\frac{L_a}{L_0} + \frac{\Delta L_\Theta}{L_0} - \frac{\Delta L_y}{L_0} \right) \times \frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta L_y}{L_0} + \frac{\Delta L_\Theta}{L_0} \right) \left(1 - \frac{L_a}{L_0} \right)}; \quad (2)$$

where *E* is a supply voltage of the scheme, K_S is a scaling coefficient and K_C is a coefficient with dimension 1/Volt.

The difference of codes C_{II}^{ext} and C_I^{ext} in (1), (2) corresponds to the extreme value of codes difference ΔC^{ext} calculated in the measurement system. Taking this into account:

³The SCECS is connected to one branch of the differential circuit with pulse supply (pulse time is 0,1 μs, frequency is 1 MHz). The SCECS simulator (SSCECS) is connected to another branch of the circuit (it inductance is equal to $L_0 - L_a$, where L_a is usually chosen to $\Delta L_{y,max}$). The currents in circuit branches are converted to the voltages on current-to-voltage converters (CVC) outputs. The voltages difference is amplified in scaling amplifier and further is converted to digital code on the output of 10-digit ADC.

$$\Delta C^{ext} = C_{II}^{ext} - C_I^{ext}, \quad (3)$$

and then after substitution of (1) and (2), the difference of the codes becomes

$$\Delta C^{ext} = K_S K_C E \frac{\Delta L_y}{L_0} \times \frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta L_y}{L_0} + \frac{\Delta L_\Theta}{L_0} \right) \left(1 + \frac{\Delta L_\Theta}{L_0} \right)}, \quad (4)$$

or

$$\Delta C^{ext} = K_S K_C E \frac{\Delta L_y}{L_0} \frac{1}{K_\Theta \left(K_\Theta - \frac{\Delta L_y}{L_0} \right)}, \quad (5)$$

where $K_\Theta = 1 + \frac{\Delta L_\Theta}{L_0}$.

Under the assumption that $\frac{\Delta L_\Theta}{L_0} \ll 1$ and $\frac{\Delta L_y}{L_0} \ll 1$ the coefficient $K_\Theta \rightarrow 1$ and the codes difference ΔC^{ext} is determined only by the RC (*y*) ($\Delta C^{ext} = K_S K_C E \frac{\Delta L_y}{L_0}$) and the temperature changes do not affect on it. In other words, the full self-compensation of temperature effects on the SCECS is achieved.

But in real conditions the coefficient K_Θ depends on the temperature and the phenomenon of "not-complete compensation" of temperature effects has taken place. According to the simulation results of the EMI of the SE of the SCECS with the blade used in the GTE compressor, and also taking into account the experimental data, the quantitative estimates of $\frac{\Delta L_y}{L_0}$ as a dependence on *y*-coordinate (RC) and $\frac{\Delta L_\Theta}{L_0}$ for temperature drop per 600 °C (from normal to nominal) were obtained.

Fig. 2, *a* shows the system CF obtained under normal (20 °C) and nominal (620 °C) temperatures. The CF demonstrate the "not-complete compensation" effect about 20 code units or more than 6 % from code deviation in RC range from 0,5 to 2,5 mm.

To reduce the "not-complete compensation" effect the method that involves the multiplication of calculated in the system difference code value by unitless number, defined by:

$$\left(K_\Theta^2 - K_\Theta \frac{\Delta L_y}{L_0} \right) \frac{1}{1 - \frac{\Delta L_y}{L_0}} \quad (6)$$

is offered.

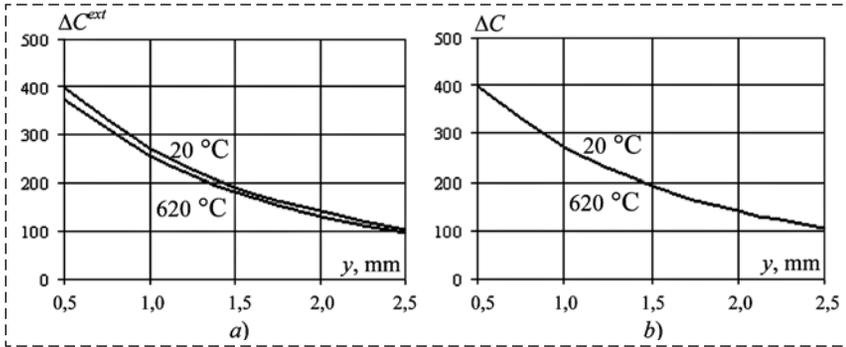


Fig. 2. Dependences of $\Delta C(y)$ under normal (20 °C) and nominal (620 °C) temperatures with "not-complete compensation" effect (a) and without it (b)

In the first approximation the expression (6) is equal to K_{Θ}^2 when the impact of changes $\frac{\Delta L_y}{L_0}$ is not taken into account. Meanwhile, the coefficient K_{Θ} is equal to 1,03 for nominal temperatures (620 °C) in the flow section of GTE.

The calculations show that the proposed method allows to reduce the "not-complete compensation" effect by more than two orders and the "not-complete compensation" effect is mostly invisible on Fig. 2, b. Indeed, if y is equal to 0,5 mm the "not-complete compensation" effect is only 0,2 code units (less than 0,1 % from the deviation of codes difference and it decreases with RC (y) increasing). The calculations also show that the changes of "not-complete compensation" effect are insignificant and do not exceed $5 \cdot 10^{-12}$ codes unit, taking into account the changes of $\frac{\Delta L_y}{L_0}$ in the same RC range.

Metrological indicators. Two indicators are discussed — the systematic and random parts of the error of the working model of the RC measurement system.

The calibration characteristic (CC) is needed for quantitative evaluation of the systematic part of the measurement error. It is like a CF $\Delta C^{ext}(y)$, but obtained by an experimental way with the help of three-dimensional calibration device equipped with mechanical timepiece indicators with a resolution of 0,01 mm. The indicators are used for the control of the displacements of the blade which is fixed to a movable platform.

The methodology for CC obtaining at first provides the pre-installation of given RC (y coordinates) and

then a manual search of the extreme code value C_I^{ext} (along z coordinate). The procedure is repeated with a given step Δy_s in the full range of the RC (0,5–2 mm). When $y \gg 2,5$ ($y \rightarrow \infty$) the code C_{II}^{ext} is fixed and the desired code differences $\Delta C^{ext}(y)$ are calculated. However, to analyze the systematic part of the measurement error the inverse of the CC function $\Delta C^{ext}(y)$ seems to be more convenient:

$$y = F(\Delta C^{ext}) = \sum_{i=0}^I A_i \Delta C^{ext}, \quad (7)$$

where A_i are the coefficients of the polynomial and I is its order.

Meanwhile, the approximated CC are used as a "supporting" functions for the determining of the systematic part of the measurement error as a difference of the given RC and the RC calculated after approximation (y_a) according to (7):

$$\Delta y = y - y_a. \quad (8)$$

It should be noted that the experiment in the normal temperature conditions is enough for obtaining of the CC (the functions of type (7)) of the working model of the RC measurement system. The distinctive features of the experiment are that the function $C_I^{ext}(y)$ is determined with a small step 0,2 mm during the calculation of the difference $\Delta C^{ext} = C_{II}^{ext} - C_I^{ext}$ at each y position and the repeating of the listed operations at least 10 times with further averaging of the obtained results ΔC^{ext} . The averaged CC of the system is given in table 1.

This averaged values ($\overline{\Delta C^{ext}}(y)$) are used for the approximation function (7) obtaining. The result of the approximation is the polynomial function $y_a(\overline{\Delta C^{ext}})$. For the polynomial order $I = 6$ the polynomial coefficients are: $A_0 = 4.2255955938$; $A_1 = -6.1557237945 \cdot 10^{-2}$; $A_2 = 6.1365638609 \cdot 10^{-4}$; $A_3 = -3.7526730997 \cdot 10^{-6}$; $A_4 = 1.3236791821 \cdot 10^{-8}$; $A_5 = -2.4719351918 \cdot 10^{-11}$; $A_6 = 1.8893005772 \cdot 10^{-14}$.

The reduced systematic part of the error is:

$$\delta_y = \frac{\Delta y}{\Delta y_{\max}} \cdot 100\%, \quad (9)$$

Table 1

Averaged CC ($\overline{\Delta C^{ext}}(y)$)											
$y, \text{ mm}$	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5
$\overline{\Delta C^{ext}}(y)$	340,27	260,75	203,91	162,78	130,35	105,30	85,87	71,00	59,16	49,42	41,37

$(\Delta \bar{C}^{ext}(y))$ values in the centers of the intervals between CC "nodes"

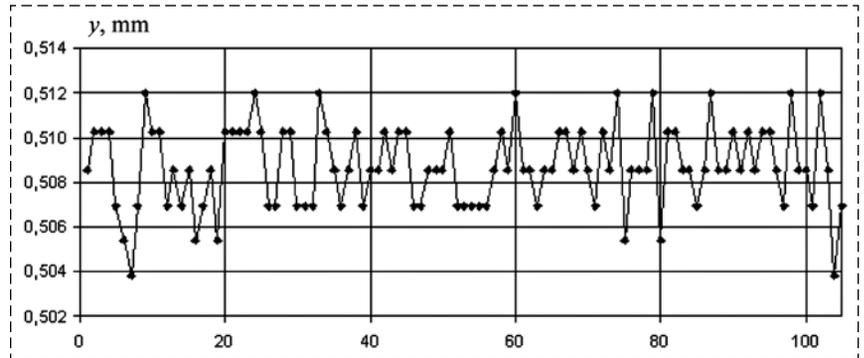
$y, \text{ mm}$	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4
$\Delta \bar{C}^{ext}(y)$	297,61	231,34	182,88	144,82	116,97	94,47	77,99	64,81	53,84	45,16

where Δy is calculated according to the expression (8) and $\Delta y_{\max} = 2 \text{ mm}$ is the largest possible RC changing. Δy is calculated according to the given values of RC (y) in the nodes of the table 1 and the values y_a , found through the expression (8)⁴. The calculations show that the systematic part of the error δ_y is small in the full range of RC (y) changing and its maximum value doesn't exceed 0,06 %.

It is known that the approximation errors between the "nodes" can be much more than in the "nodes" when the order polynomials are used. To evaluate these errors the values of the difference $\Delta \bar{C}^{ext}$ were obtained experimentally (they are given in the table 2 at the RC (y) selected in the centers of the intervals between y coordinates given in table 1). After the calculation of the y_a value for the same y coordinates the errors δ_y were obtained. They are much more than the errors in the "nodes", but their maximum value does not exceed 0,26 %.

The experiment on the estimation of the random part of the error is carried out in fixed position of the blade relatively to SE of SCECS when the RC (y) is 0,5 mm. The analysis of the sample fragment with the size 105 codes C_I^{ext} shows that the most of the codes are within 5 digits of dispersion (standard deviation is 1,11 digits). The random error of codes C_{II}^{ext} is virtually eliminated in the RC measuring system due to the statistical techniques by means of the histogram. That is why the standard deviation of codes ΔC^{ext} will be the same as of codes C_I^{ext} . At the same time the reduced random part of the error is determined by the ratio of standard deviation to changes of the differenced code in the RC range from 0,5 to 2,5 mm. According to the table 1 these changes are about 300 code's digits and when the standard deviation is 1,11 code's digits the reduced random part of the error is estimated in about 0,3 %.

Referring to the codes sample C_I^{ext} it should be noted that for known \bar{C}_{II}^{ext} the ΔC^{ext} can be cal-

Fig. 3. Sample of the calculated RC (y) to a given value of $y = 0,5 \text{ mm}$

culated and then ΔC^{ext} can be converted to RC (y) according to (7). The results are given on fig. 3.

When ΔC^{ext} is converted to RC the random error is substantially reduced because of the curvature of the $\Delta C^{ext}(y)$ function in the neighborhood of $y = 0,5 \text{ mm}$. The RC (y) standard deviation is 0,00184 mm and its relative value led to the range of 2 mm is about 0,1 %.

The evaluation of the efficiency of the working model of the measuring system. The evaluation is carried out by the experimental comparison of the given RC between SE of SCECS and the blade tips of the real RW of the compressor with an electric drive (during its rotation) and the RC obtained after data processing in the measuring system (the RW speed is constant during the experiment). The changes over time of the $C(t)$ codes on the exit of the transducer, the difference of the codes $\Delta C(t) = \bar{C}_{II}^{ext} - C(t)$, its extreme value ΔC^{ext} and the histogram that illustrates the obtaining of \bar{C}_{II}^{ext} code for one period of the RW rotation are fixed during the experiment too.

Fig. 4 shows a schematic of the RW with a blade row and SCECS which SE is located at a distance of RC from the controlled blade tip.

The displacement of SCECS along Y axis of the reference frame $OXYZ$ which simulate possible RC changes during the compressor operation is carried out by a special equipment. The compressor wheel is driven by direct current electric motor with controlling of its rotational speed up to 500 rpm (rotational speed is limited owing to safety reasons). The RC changes are monitored by the mechanical

⁴As such the systematic part of the error is in fact an approximation error.

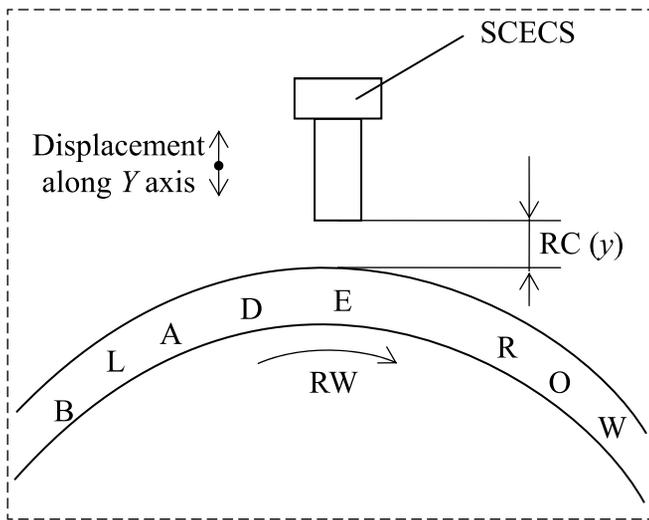


Fig. 4. Schematic of the RW with a blade row and SCECS

timepiece indicator with resolution 0,01 mm (the indicator is not shown in Fig. 4).

It is obvious that the listed equipment makes it possible to obtain the CC not only in static mode of RW, but also in the dynamics (i.e. during its rotation). Of course, the use of dynamic mode of obtaining the CC cannot rely on the official certification and guarantee the metrological validity of the experimental results. But its possible use for the evaluation of the measuring system hardware and software is unquestionable.

In order to obtain the CC target values of RC (y coordinate) are set in the limited range from 0,75 mm to 2,25 mm with step 0,5 mm. The extreme values of codes difference ΔC^{ext} are defined for the blade no. 1 for each y value during RW rotation. The obtained CC as the function $y = f(\Delta C^{ext})$ are approximated by the polynomial with the order downgraded to 3. Its coefficients are entered into the system for use in special procedure for calculation of the desired RC (y).

Then the intermediate y values between "nodes" of the CC table are set and the calculation of the RC takes place in the measuring system.

The difference between the given and the calculated values of RC (y), expressed as a percentage of the RC measuring range was approximately about 1 % RC 1,5 and 2,0 mm and about 5 % for RC 1,0 mm. The obtained results confirm the operating capability of the hardware and software tools of the working model of the measuring system.

Fig. 5, *a* shows the changes over time of the codes on the transducer exit ($C(t)$) when the blades no. 1, 2, ..., 6 (minimum) and corresponded blade-to-blade gaps (maximum) (1) pass the SCECS. The changes were obtained on the working model of the measuring system during the RW rotation and they illustrate the operation of the system (temperature changes ($\Delta\theta \approx 600$ °C) are simulated by additional coil with inductance $L_a \approx 0,03L_0$ connected in series to the primary winding of MT). There the changes over time of the codes difference $\Delta C(t) = \bar{C}_{II}^{ext} - C(t)$ and its extreme values which are defined in the system (they are shown by a dots) (2) are presented.

The averaged extreme values of the codes were found on the previous period of the RW rotation as a result of the statistical processing with the help of the histogram (Fig. 5, *b*). The vertical line sets the array $g|C|$, where symbol "C" corresponds to the value of the registered code and the value of the array element $g|C|$ is a frequency of its appearance in the sample. The global extremum of the histogram corresponds to the desired averaged value of the code \bar{C}_{II}^{ext} [20]. The averaged value of the code \bar{C}_{II}^{ext} is shown by a horizontal dashed line.

About the performance of the system and the possibility of reducing of the random part of the error. The frequency of the codes on the exit of the transducer is defined by the frequency of a

pulsed power supply of SCECS which equals to 1 MHz (at a constant and very short duration of the pulses $\Delta t = 10^{-7}$ s) and limited to a marginal capabilities of the selected microcontroller.

It should be noted that when determining the desired extreme values of the differenced codes corresponding to each of n blade their updating is happening with time intervals equal to the period of RW rotation. Assuming a compressor is an object of the diagnostics of dangerous states and GTE

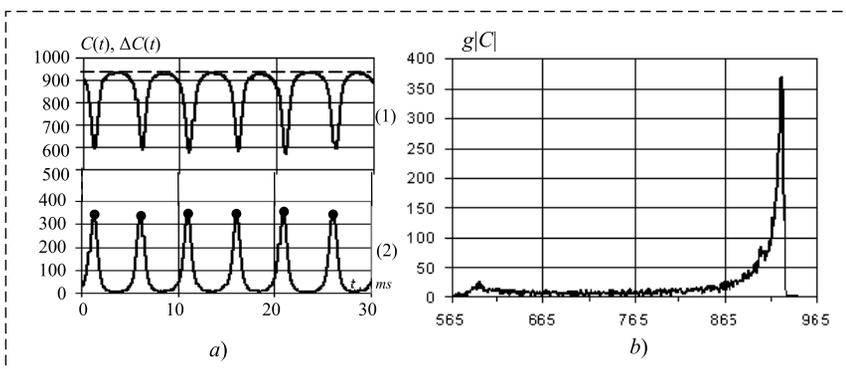


Fig. 5. Dependence of the code on the transducer exit $C(t)$ (1), codes difference $\Delta C(t)$ and its extreme values (dots) (a), the histogram for averaged values of the code \bar{C}_{II}^{ext} (b)

is applied in the electricity industry, providing the rotation of the generator rotor with constant speed 3000 rpm, the period of the RW rotation will be 20 ms. That time is enough, for example, for detection of the engine surge that can be fixed on the changes of ΔC^{ext} , to be exact — on the RC changes related to the beginning of oscillations in the gas-air duct (if the number of blades is $n = 100$ and the frequency on the exit of the transducer is 1 MHz then the extremes of the codes difference appear through 0,2 ms and the number of codes is 200 per blade). Unlike the existing systems for RC measuring with SCECS where data processing is done in PC, the proposed working model provides the data processing in real time in the microcontroller during one period of RW rotation [20].

In the same literature source [20] the opportunities for reducing of the random part of the errors are considered. At the same time, it is pointed out that the discretization process and unremovable noise in MC (transducer) are the main reasons for the random errors. It is obvious that the sampling step depends on the frequency of a pulsed power supply of SCECS and the RW rotation speed. With the increase in the frequency the sampling step decreases (at a constant rotation speed) and increases with the increase in the rotation speed (at constant frequency of a pulsed power supply). The changes of the sampling step at the given frequency of a pulsed power supply can be a source of the error of a random nature. To quantify these errors the well-known model of the EMI of the SE with the turbine blade tip, adapted to the compressor blade, was used [20]. Computational experiments showed that at the frequency of a pulsed power supply equals to 1 MHz and RW rotation speed equals to 3000 rpm the reduced error is only 0,012 %. This means that in the example the sampling error can be ignored (especially in view of increase of the frequency of a pulsed power supply and using the microcontroller with higher performance).

However, there is still the random part of the error related to the unremovable noise in MC. As it was shown earlier (during studies of the metrological indicators) the standard deviation at RC (y) 0,5 mm is 1,11 units of code and the relevant part of the error normalized to the maximum possible deviation of the codes difference ΔC^{ext} is about 0,3 % and that is far above the sampling error at the rotation speed 3000 rpm.

Then the averaging of the extreme values of differenced codes corresponding to each blade at several periods of RW rotation will reduce the random

part of the error by \sqrt{N} times [20], where N is the number of the periods of RW rotation. It means that at rotation speed 3000 rpm and $N = 10$ the error 0,3 % will be less than 0,1 %. The duration of the conversion will be 0,2 s.

Conclusion

The hardware, algorithms and software of the system for the RC measuring are developed. The working model of the measuring system for experimental studies of the metrological indicators and the efficiency of the system is made. The distinctive feature of the system and its working model is the self-compensation of temperature effects on the SCECS. The operations envisaged for the self-compensation are executed in real time in microcontroller.

The phenomenon of "not-complete compensation" of temperature effects on SCECS is considered. The phenomenon is related to the special features of the conversion of the SCECS informative parameter in MC with ADC on its output and the method of its elimination is given. Using the self-compensation coupled with the proposed method ensures the minimization of SCECS and related mounting holes in the compressor stator and makes it possible to use the system for detection of dangerous states of GTE during its operation.

The results of the experimental researches of the metrological indicators of the measuring system were carried out. In order to define the systematic part of the measuring error the CC was used. It was approximated by the polynomial function and the error was found as a difference between the given and the calculated RC (y). It was shown that the reduced systematic part of the error in the range of the RC from 0,5 to 2,5 mm does not exceed 0,06 % in the "nodes" of the calibration table but it equals 0,26 % between the "nodes". It is also shown that the reduced value of the random part of the error that was determined at the minimum RC (0,5 mm) as the ratio of standard deviation to changes of the differenced code in the same RC range is about 0,3 %. The error decreases to 0,1 % when the standard deviation is converted to RC (y) changes using the CC approximated by the polynomial function (due to the increased slope of CC when RC is 0,5 mm).

The efficiency of the working model was evaluated on the laboratory equipment during the rotation of the electrically driven compressor wheel. The CC without claiming to metrological validity was obtained according to the simplified method.

The CC was entered into PC and used to compute the RC physical values. It is shown that the difference between given and calculated values of RC (y), expressed as a percentage of the RC measuring range, does not exceed some percentage units and this confirms the system's efficiency.

The quantitative estimates of speed and accuracy of the working model of the measuring system are given. They confirmed the possibility of using the system for detection of dangerous states of GTE applied in the electrical power industry. It is shown that at the constant speed of the compressor RW rotation equals to 3000 rpm, the updating of the information about the RC to each blade tip is happening in one period of RW rotation (i. e. 20 ms) by applying the microcontroller. This time is enough for using the system for detection of the engine surge in gas-air duct. It is also shown that the random part of the error can be reduced three times over 10 periods of RW rotation to which corresponds to 0,2 ms.

References

1. **Danilchenko V. P., Lukatchev S. V., Krylov Yu. L. et al.** Engineering of aircraft gas-turbine engines, Samara, Publishing house of SamNTS RAN, 2008, 619 p.
2. **Prokopets A., Revzin B. Rozhkov A.** The need for diagnosis of radial clearances in gas-turbine engines, *Gazoturbinnye Tekhnologii*, 2004, no. 4 (31), pp. 5–7.
3. **Kuznetsov N. D., Danilchenko V. P., Reznik V. E.** Radial clearances control in turbo-compressors of gas-turbine engines, Samara, Samarskiy aviatsionnyj institute, 1991, 109 p.
4. **Lattime S., Steinetz B.** Turbine Engine Clearance Control Systems: Current Practices and Future Directions, *38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Indianapolis, USA, July 7–10, 2002.
5. **Lattime S., Steinetz B., Robbie M.** Test Rig for Evaluating Active Turbine Blade Tip Clearance Control Concepts, *39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Huntsville, Alabama, July 20–23, 2003.
6. **Kratz J. L., Chapman J. W., Guo T. H.** A parametric study of actuator requirements for active turbine tip clearance control of a modern high bypass turbofan engine, *ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, Charlotte, USA, 26–30 June, 2017, vol. 6, V006T05A005, DOI:10.1115/GT2017-63472.
7. **Simon D., Gang S., Hunter G.** et al. Sensor Needs for Control and Health Management of Intelligent Aircraft Engines, *ASME Turbo Expo 2004*, Vienna, Austria, 14–17 June, 2004.
8. **Inozemtsev A. A., Bazhin S. V., Snitko M. A.** Optimization of the Radial Clearances of the Turboprop Engine of an Aviation GTE, *Vestnik Dvigatelistroeniya*, 2, 2012, pp. 149–154.
9. **Sekisov Yu.N., Skobelev O. P.** ed. Methods and tools for measuring of multi-dimensional displacements of power-plant constructional elements, Samara, Samarskiy nauchnyj centr RAN, 2001, 188 p.
10. **Skobelev O. P.** ed. Cluster methods and tools for measuring of deformations and coordinates of blade tips displacements in gas-turbine engines, Moscow, Mashinostroenie, 2011, 298 p.
11. **Skobelev O. P.** ed. Cluster methods and tools for measuring of radial clearances in turbine's flow section, Moscow, Innovatsionnoe Mashinostroenie, 2018, 224 p.
12. **Belopukhov V. N., Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M. et al.** The method for measuring of radial clearances in gas-turbine engine with self-compensation of temperature effects on the sensor, *Datchiki i Systemy*, 2018, no. 4, pp. 53–59.
13. **Belopukhov V. N., Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M. et al.** Measuring of radial clearances in gas-turbine engine with self-compensation of temperature effects on the sensor. The conversion function sets of the sensor and measuring circuit, *Datchiki i Systemy*, 2019, no. 4, pp. 39–46.
14. **Kuteynikova M. M., Podlipnov P. E.** Influence of the wheel displacements on the result of radial clearances measuring by means of self-compensation of temperature effects on the sensor, *Vestnik SamGTU, Seriya "Tekhnicheskie nauki"*, 2017, no. 4 (56), pp. 76–84.
15. **Podlipnov P. E.** Influence of the temperature on controlled and neighboring blades of the compressor during radial clearances measuring with self-compensation of temperature effects on the sensor, *Vestnik SamGTU, Seriya "Tekhnicheskie nauki"*, 2018, no. 3 (59), pp. 106–117.
16. **Borovik, S. Y., Podlipnov, P. E., Sekisov Y. N. et al.** Influence of Disturbing Factors in a System for Measuring Radial Clearances in Gas-Turbine Engines with Temperature Self-Compensation, *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2019, no. 4 (55), pp. 388–398. <https://doi.org/10.3103/S8756699019040101>.
17. **Belopukhov V. N., Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M. et al.** The structure and operation algorithms of the system for measuring of radial clearances with self-compensation of temperature effects, *Vestnik SamGTU, Seriya "Tekhnicheskie nauki"*, 2018, no. 4 (60), pp. 52–65.
18. **Datasheet**, available at: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00037051.pdf>
19. **Belopukhov V. N., Borovik S. Yu., Podlipnov P. E. et al.** Cluster methods for measuring of radial clearances with self-compensation of temperature effect in flow section of gas-turbine engine, *XIII all-Russian conference on control problems*, Moscow, Russia, June 17–20, 2019, pp. 2698–2703.
20. **Belopukhov V. N., Borovik S. Yu., Podlipnov P. E. et al.** Methods for preliminary data processing in the system for measuring of radial clearances with self-compensation of temperature effects on the sensor in flow section of GTE, *XXI international conference "Complex Systems: Control and Modelling Problems"*, Samara, Russia, 3–6 September, 2019, vol. 2, pp. 117–121.

И. Г. Горячева^{1, 2}, акад. РАН, goryache@ipmnet.ru,

М. З. Досаев¹, канд. физ.-мат. наук, dosayev@imec.msu.ru,

Ю. Д. Селюцкий¹, канд. физ.-мат. наук, seliutski@imec.msu.ru,

А. А. Яковенко², аспирант, dolgopur_13@mail.ru, С.-Н. Hsiao³, аспирант, n16061480@mail.ncku.edu.tw,

С.-Yu. Huang³, профессор, gordon168999@yahoo.com.tw, М.-S. Ju³, профессор, msju@mail.ncku.edu.tw,

С.-Н. Yeh³, PhD, longerplus@gmail.com,

¹ НИИ механики МГУ, Москва,

² Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва,

³ Национальный университет Чен Кун, Тайнань, Тайвань

Управление внедрением индентора в вязкоупругую ткань с использованием пьезоэлектрического привода¹

Стереотаксические операции активно применяются в современной малоинвазивной медицине. При этом во внутренние органы вводится гибкая игла, с помощью которой осуществляется биопсия или проводится локальное лечение. Применение подобных подходов в нейрохирургии требует обеспечения точного позиционирования кончика иглы в целевой точке. Настоящее исследование связано с созданием робототехнической системы, доставляющей иглу в заданную точку и использующей приводы, совместимые с аппаратами магнитно-резонансной томографии, визуализирующими положение иглы. В данной работе предложена конечномерная математическая модель мехатронной системы, использующей пьезоэлектрический привод (ПЭП) для перемещения иглы (канюли) вдоль заданной прямой. Для описания контакта канюли с мягкой тканью разработана математическая модель их взаимодействия. Решена контактная задача, описывающая два процесса, протекающих в ходе внедрения иглы в биологическую ткань: внедрение жесткого (по сравнению с тканью) индентора и его удержание на определенной глубине. При этом учитываются релаксационные свойства ткани. Поведение ткани описывается с помощью феноменологического подхода, основанного на модифицированной модели Кельвина—Фойгта. Это позволило свести решение контактной задачи к интегрированию системы обыкновенных дифференциальных уравнений.

Одним из признанных способов разработки и отладки медицинских робототехнических систем является тестирование их функционирования с применением фантомов биологических тканей. С этой целью изготовлен фантом свиного головного мозга на основе агар-агара. Проведены эксперименты по индентированию стандартной канюли в тело фантома. На основе полученных экспериментальных данных проведена идентификация параметров модели контакта. Предложен алгоритм управления частотой ПЭП, обеспечивающий внедрение канюли в мягкую биологическую ткань на заданную глубину. Проведено численное моделирование внедрения канюли в мягкую ткань с использованием этого алгоритма. Исследовано влияние коэффициентов обратной связи по положению и скорости индентора на характер процесса внедрения.

Ключевые слова: стереотаксическая операция, пьезоэлектрический привод, математическая модель, контактные характеристики, алгоритм управления

Введение

Одним из современных направлений малоинвазивной медицины являются стереотаксические операции, при которых во внутренние органы вводится гибкая игла для проведения определенных процедур. Одним из важных и активно развивающихся видов таких операций является введение игл в головной мозг для взятия биопсии или проведения локального лечения (например, глубинной стимуляции головного мозга при лечении таких болезней, как болезнь Паркинсона, эпилепсия и т. п.). В разных странах мира создаются и совершенствуются специальные роботизированные системы, предназначенные для проведения таких операций. Основной задачей подобной системы является обеспечение

точного позиционирования кончика иглы в целевой точке. Наиболее перспективным способом визуализации положения иглы относительно целевой точки в теле человека является магнитно-резонансная томография (МРТ) [1, 2], дающая погрешность в пределах до 1 мм. Серьезной проблемой является разработка робототехнической системы, направляющей иглу в заданную точку и использующей приводы, не нарушающие работу аппарата МРТ. Одним из типов приводов, совместимых с МРТ, являются пьезоэлектрические приводы (ПЭП). В работе [3] для привода роботизированного пинцета применен ПЭП, размещенный в исполнительном звене хирургического робота. В работе [4] авторы использовали прецизионный ПЭП в качестве линейного двигателя роботизированной хирургической системы для биопсии головного мозга. Благодаря своим достоинствам, таким как быстрый отклик, достаточность усилия, безопасность фрикционной передачи, в последние годы ПЭП все чаще предлагаются в качестве двигателей

¹ Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-58-52004) и министерства науки и технологии Тайваня (MOST 108-2923-E-006-003-MY3).

для различных биомедицинских приборов [5, 6]. Параллельно развиваются и методы моделирования пьезоэлектрических двигателей. В. Вурптс и Д. Твифел [7] предложили моделировать такой двигатель с помощью осциллятора с двумя степенями свободы. Подобный подход был развит в работах [8, 9]. Некоторые аспекты управления мехатронными системами с помощью ПЭП рассмотрены в работе [10].

При управлении иглой необходимо учитывать многие факторы: жесткость иглы, механические свойства биологических тканей, различные медицинские аспекты, такие, например, как допустимая скорость введения иглы, при которой в ткани не возникнет неприемлемых повреждений, и т. д. Система управления гибкой иглой, внедряемой в достаточно плотную ткань, предложена, в частности, в работе [11].

Введение новых приборов в клиническую практику требует длительных предварительных тестов. Одним из признанных способов отработки и тестирования инновационных методов и механизмов является экспериментальное исследование применения таких инструментов на фантомах биологических тканей [12, 13].

В ряде работ (в частности, [14]) процесс внедрения иглы в мягкие ткани моделируется с помощью метода конечных элементов. Однако такой способ не позволяет эффективно строить алгоритм управления движением иглы. Для этого целесообразно разработать феноменологическую модель, в которой взаимодействие ткани с иглой описывалось бы динамической системой (по возможности невысокого порядка).

Для создания модели взаимодействия иглы с фантомом биологической ткани следует решить контактную задачу, описывающую два процесса: внедрение жесткого индентора в основание и удержание его на определенной глубине. При этом необходимо учитывать релаксационные свойства фантома. В работах [15, 16] получено решение задачи о нагружении основания и последующем его свободном восстановлении. Для описания механического поведения основания использовалась модель сплошной среды, позволяющая оценить только малые деформации основания. В целях описания произвольных деформаций основания с учетом его релаксационных характеристик в настоящем исследовании, аналогично работе [17], используется упрощенная модель механического поведения фантома, позволяющая проанализировать экспериментально исследуемый процесс внедрения иглы в фантом биологической ткани и ее удержания в ткани.

В данной работе предложена конечномерная математическая модель робототехнической си-

стемы, перемещающей канюлю вдоль заданной прямой и использующей ПЭП в качестве привода, в которой для описания контакта иглы с мягкой тканью используется решение задачи о внедрении и удержании иглы в вязкоупругом теле. Изготовлен фантом головного мозга свиньи. Проведены эксперименты с индентированием канюли в тело фантома. На основе проведенных экспериментов выполнена процедура идентификации параметров модели контакта. Предложен алгоритм управления частотой ПЭП, обеспечивающий внедрение канюли в мягкую биологическую ткань на заданную глубину. Проведено численное моделирование внедрения канюли в мягкую ткань с использованием такого алгоритма.

Описание и математическая модель системы

Рассматриваемая механическая система состоит из тонкого индентора (канюли), который установлен в направляющих и может совершать поступательное движение вдоль продольной оси, и ПЭП (рис. 1). Введем неподвижную систему координат OXY , ось абсцисс которой направим вдоль направления движения индентора. Будем считать, что система находится в горизонтальной плоскости. Трением в направляющих индентора будем пренебрегать.

Тогда, очевидно, уравнение динамики индентора в проекции на ось OXY выглядит так:

$$m\ddot{x} = F - P. \quad (1)$$

Здесь m — масса индентора; P — сила, действующая на индентор со стороны ткани; F — сила, действующая на индентор со стороны головки привода.

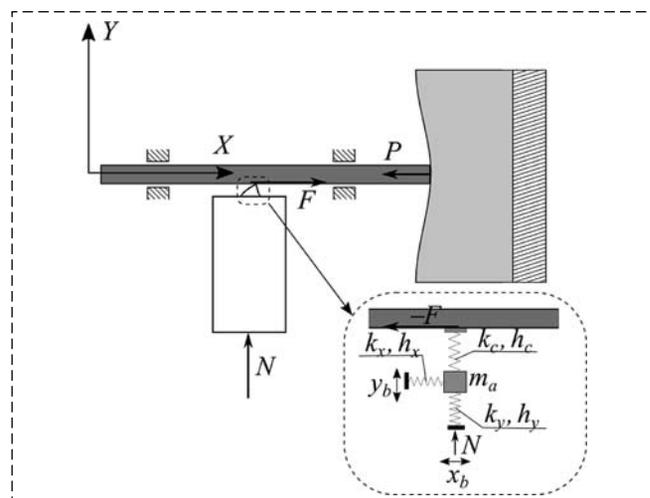


Рис. 1. Модель пьезоэлектрического привода
Fig. 1. Model of a piezoelectric drive

Будем моделировать динамику ПЭП с помощью эмпирического подхода, описанного, в частности, в работах [7—9]. Под действием переменного электрического напряжения с частотой ω , приложенного к ПЭП, головка привода совершает колебания, при которых траектории движения ее точек близки к эллипсам. Примем, что координаты x_b, y_b середины основания головки зависят от времени следующим образом:

$$x_b = A_x \sin 2\pi\omega t, \quad y_b = A_{y0} + A_y \sin(2\pi\omega t + \Phi).$$

Предположим также, что головка ПЭП прижимается к приводу с некоторой силой N .

В рамках используемого феноменологического подхода динамика головки привода описывается с помощью осциллятора с двумя степенями свободы (рис. 1).

Обозначим соответствующие обобщенные координаты x_a, y_a . Составим уравнения движения этого осциллятора:

$$\begin{aligned} m_a \ddot{x}_a &= -k_x(x_a - x_b) - h_x(\dot{x}_a - \dot{x}_b) - F; \\ m_a \ddot{y}_a &= -k_y(y_a - y_b) - h_y(\dot{y}_a - \dot{y}_b) - k_c y_a - h_c \dot{y}_a. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь m_a — масса осциллятора; k_x, k_y, k_c — коэффициенты жесткости пружин осциллятора; h_x, h_y, h_c — коэффициенты демпфирования. Сила F , развиваемая ПЭП, определяется следующим соотношением:

$$F = \mu \operatorname{sgn}(\dot{x}_a - V)(k_c x_a + h_c \dot{x}_a).$$

Здесь V — скорость точки поверхности, с которой контактирует головка привода (в данном случае $V = \dot{x}$).

Среднее смещение A_{y0} найдем из условий равновесия:

$$\begin{aligned} 0 &= -k_y(y_{a0} - A_{y0}) - k_c y_{a0}; \\ k_y(y_{a0} - A_{y0}) &= N, \end{aligned}$$

где y_{a0} — положение осциллятора в состоянии равновесия. Отсюда получаем:

$$y_{a0} = -N/k_c, \quad A_{y0} = -N(1/k_y + 1/k_c).$$

Поскольку частота ω , которую требуется подавать на ПЭП, достаточно велика, численное интегрирование системы (2) занимает сравнительно долгое время. Вместе с тем характерное время движения индентора существенно больше характерного периода колебаний осциллятора, поэтому при анализе динамики головки ПЭП можно считать, что в течение периода скорость V индентора не меняется. Соответственно, при моделировании динамики внедрения индентора в контуре управления целесообразно использовать результаты предварительного расчета среднего значения силы,

развиваемой приводом при различных значениях частоты возбуждения.

При индентировании в достаточно "мягкую" и/или чувствительную ткань сила, развиваемая приводом, должна быть мала (иначе внедрение окажется слишком быстрым, что может привести к повреждению ткани). В этой ситуации оказывается существенной зависимость этой силы не только от частоты возбуждения, но и от значения скорости V точки поверхности, с которой контактирует головка ПЭП (в данном случае от скорости индентора).

Проведем численное моделирование динамики системы (2) при разных значениях V и ω , используя следующие значения параметров модели:

$$\begin{aligned} m_a &= 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг}; \quad k_x = k_y = 10^7 \text{ Н/м}; \\ h_x &= h_y = 0,6 \text{ Н} \cdot \text{с/м}; \quad k_c = 10^6 \text{ Н/м}; \\ h_c &= 2 \text{ Н} \cdot \text{с/м}; \quad \mu = 0,28; \quad N = 4 \text{ Н}; \\ A_x &= 0,41 \text{ мкм}; \quad A_y = 0,76 \text{ мкм}; \quad \Phi = 0. \end{aligned}$$

На рис. 2 представлены зависимости среднего за период значения силы F от V . Видно, что при малых скоростях сила (при фиксированной частоте) убывает практически линейно с ростом V . Данный эффект описан, в частности, в работе [18]. Отметим, что скорость этого убывания растет (по абсолютной величине) с ростом частоты ω .

Максимальная сила, развиваемая ПЭП при данных значениях параметров, равна примерно 0,56 Н (достигается при $\omega = \omega^* \approx 26\,400$ Гц и $V = 0$).

Результаты моделирования будем в последующем использовать при определении частоты возбуждения, необходимой для реализации требуемой силы, развиваемой ПЭП.

Исследуем, как будет происходить процесс внедрения индентора в вязкоупругую ткань

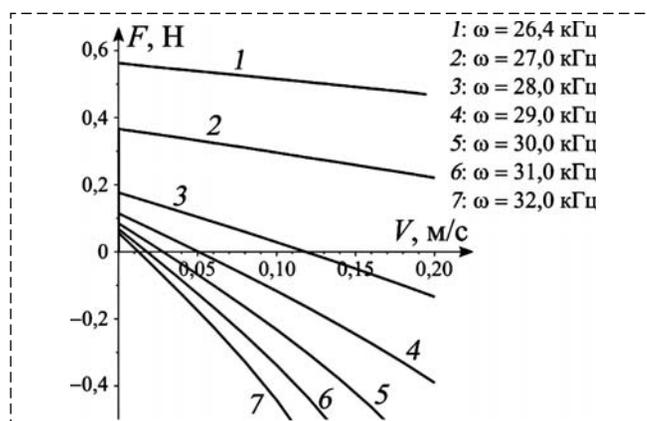


Рис. 2. Зависимость силы, развиваемой ПЭП, от частоты возбуждения и скорости индентора

Fig. 2. Force generated by PED vs. Excitation frequency and indenter speed

при фиксированной частоте внешнего напряжения, подаваемого на ПЭП. Для этого необходимо построить модель, описывающую взаимодействие ткани с индентором.

Модель контактного взаимодействия

Рассматривается осесимметричная контактная задача о взаимодействии жесткого индентора, форма контактирующей поверхности которого описывается функцией $f(r)$, с вязкоупругим слоем толщины h , лежащим на жестком основании (рис. 3). Материал слоя предполагается однородным изотропным линейно вязкоупругим. Скорость нагружения основания V_1 постоянна. При внедрении сферического или цилиндрического индентора область контакта будет кругом радиуса a . Поместим начало цилиндрической системы координат в центр области контакта, ось OX направим вдоль оси симметрии индентора.

Будем считать, что процесс нагружения вязкоупругого слоя включает две стадии: внедрение с постоянной скоростью до некоторой глубины, а затем поддержание постоянной глубины внедрения. Иными словами, зависимость внедрения от времени выражается следующей формулой:

$$x(t) = \begin{cases} V_1 t, & t \leq t_1; \\ V_1 t_1, & t_1 \leq t. \end{cases} \quad (3)$$

Для описания поведения вязкоупругого слоя используем обобщенную модель Кельвина—Фойгта. Механический аналог модели представлен на рис. 3, б. Она состоит из n элементов, каждый из которых имеет свои характеристики. Вертикальное перемещение $u_z^{(i)}(r, t)$ при деформировании такой модели одинаково для каждого элемента и равно смещению границы слоя, а контактное давление на поверхности слоя $p(r, t)$ определяется суммированием давлений в каждом элементе, т. е.

$$u_z(r, t) = u_z^{(i)}(r, t) \text{ и } p(r, t) = \sum_{i=1}^n p_i(r, t). \quad (4)$$

Определяющее соотношение для каждого элемента в этой модели имеет вид

$$p_i(r, t) + T_\sigma^{(i)} \frac{dp_i(r, t)}{dt} = \frac{E_i}{(1-\nu^2)h} \left(u_z(r, t) + T_\varepsilon^{(i)} \frac{du_z(r, t)}{dt} \right), \quad i = 1, \dots, n, \quad (5)$$

где E_i и ν — модуль упругости и коэффициент Пуассона; $T_\sigma^{(i)}$ и $T_\varepsilon^{(i)}$ — времена релаксации и ползучести. Через параметры модели эти величины определяются следующим образом:

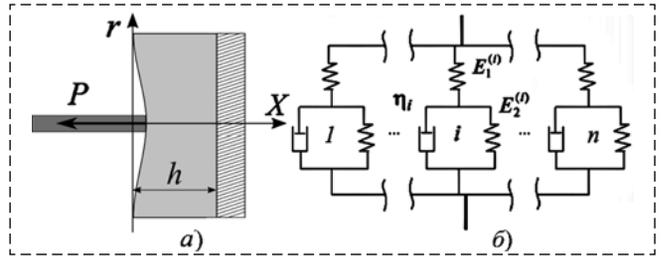


Рис. 3. Схема контактной задачи (а); обобщенная модель Кельвина—Фойгта ($E_1^{(i)}, E_2^{(i)}$ — жесткость пружин; η_i — вязкость демпферного элемента) (б)

Fig. 3. Scheme of the contact problem (а); generalized Kelvin—Voigt model ($E_1^{(i)}, E_2^{(i)}$ — spring stiffness; η_i — viscosity of damper element) (б)

$$E_i = \frac{E_1^{(i)} E_2^{(i)}}{E_1^{(i)} + E_2^{(i)}}, \quad T_\sigma^{(i)} = \frac{\eta_i}{E_1^{(i)} + E_2^{(i)}}, \quad T_\varepsilon^{(i)} = \frac{\eta_i}{E_2^{(i)}}.$$

Решим систему уравнений (5) отдельно для каждой стадии процесса.

Для стадии нагружения условие контакта запишется следующим образом:

$$u_z(r, t) = V_1 t - f(r), \quad r \leq a, \quad t \leq t_1. \quad (6)$$

С учетом условия (6) решение уравнения (5) можно записать в виде

$$p_i(r, t) = \frac{E_i}{(1-\nu^2)h} (V_1(t - T_\sigma^{(i)} + T_\varepsilon^{(i)}) - f(r)) + C_1^{(i)} e^{-t/T_\sigma^{(i)}}, \quad r \leq a, \quad t \leq t_1. \quad (7)$$

Постоянная $C_1^{(i)}$ находится из начальных условий, что $p_i(r, t_0(r)) = 0$, где $t_0(r)$ — момент времени, когда на точку с координатой r начинает действовать индентор.

Для стадии удержания условие контакта будет следующим:

$$u_z(r, t) = V_1 t_1 - f(r), \quad r \leq a, \quad t_1 \leq t. \quad (8)$$

Решение уравнения (5) с учетом условия (8) будет иметь вид

$$p_i(r, t) = \frac{E_i}{(1-\nu^2)h} (V_1 t_1 - f(r)) + C_2^{(i)} e^{-t/T_\sigma^{(i)}}, \quad r \leq a, \quad t_1 \leq t. \quad (9)$$

Постоянная $C_2^{(i)}$ находится из условия, что в момент $t = t_1$ давления, вычисленные по формулам (7) и (9), совпадают.

Нагрузка, приложенная к индентору, находится из условия равновесия, а именно

$$P(t) = 2\pi \int_0^a r p(r, t) dr = 2\pi \int_0^a r \sum_{i=1}^n p_i(r, t) dr = 2\pi \sum_{i=1}^n \int_0^a r p_i(r, t) dr. \quad (10)$$

Начальные условия и размер области контакта зависят от формы контактирующей поверхности индентора.

Рассмотрим индентор в форме цилиндра с плоским основанием радиуса R . В этом случае радиус области контакта постоянен ($a = R$), а давление распределено под поверхностью индентора равномерно, т. е. $p_i(r, t) = p_i(t)$ ($r \leq R$). Начальное условие для контактного давления $p_i(0) = 0$. Отсюда найдем, что

$$C_1^{(i)} = E_i V_1 (T_\sigma^{(i)} - T_\varepsilon^{(i)}) / (1 - \nu^2) h$$

$$\text{и } C_2^{(i)} = V_1 (T_\sigma^{(i)} - T_\varepsilon^{(i)}) (1 - e^{-t_1/T_\sigma^{(i)}}).$$

Тогда, как следует из соотношений (7) и (9), распределение контактного давления в произвольный момент времени имеет вид

$$p_i(t) = \frac{E_i}{(1 - \nu^2) h} \times$$

$$\begin{cases} V_1 (t - (T_\sigma^{(i)} - T_\varepsilon^{(i)})) (1 - e^{-t/T_\sigma^{(i)}}), & t \leq t_1; \\ V_1 (t_1 - (T_\sigma^{(i)} - T_\varepsilon^{(i)})) (e^{t_1/T_\sigma^{(i)}} - 1) e^{-t/T_\sigma^{(i)}}, & t_1 \leq t. \end{cases} \quad (11)$$

Таким образом, для силы, действующей со стороны ткани на индентор в процессе нагружения (3), получим из соотношения (11) следующее выражение:

$$P(t) = \frac{\pi R^2}{(1 - \nu^2) h} \sum_{i=1}^n E_i \times$$

$$\begin{cases} V_1 (t - (T_\sigma^{(i)} - T_\varepsilon^{(i)})) (1 - e^{-t/T_\sigma^{(i)}}), & t \leq t_1; \\ V_1 (t_1 - (T_\sigma^{(i)} - T_\varepsilon^{(i)})) (e^{t_1/T_\sigma^{(i)}} - 1) e^{-t/T_\sigma^{(i)}}, & t_1 \leq t. \end{cases} \quad (12)$$

Отметим, что величина $\sum_{i=1}^n E_i$ соответствует длительному модулю упругости, а величина $\sum_{i=1}^n E_i T_\varepsilon^{(i)} / T_\sigma^{(i)}$ — мгновенному. Число n элементов в вязкоупругом слое необходимо выбирать с учетом данных экспериментов.

Эксперимент и идентификация параметров модели контактного взаимодействия

Для идентификации параметров модели в Национальном университете Чен Кун был изготовлен фантом головного мозга свиньи, представляющий собой полусферу радиусом $h = 0,065$ м, изготовленный из агар-агара определенной концентрации. В ходе эксперимента в фантом, лежащий на жесткой поверхности, по его оси симметрии с заданной постоянной

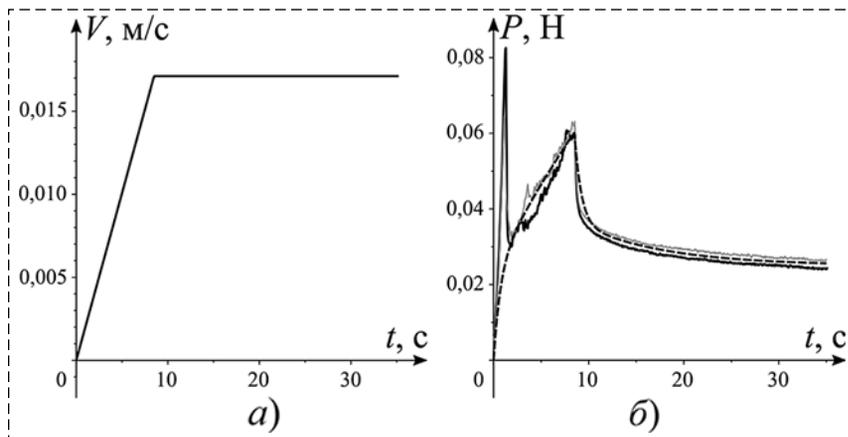


Рис. 4. Идентификация параметров модели контактного взаимодействия:

a — зависимость глубины внедрения в эксперименте от времени; b — зависимость силы сопротивления ткани от времени (сплошные линии — экспериментальные данные, штриховая — результаты расчета)

Fig. 4. Identification of contact interaction parameters:

a — indentation depth in experiment vs. time; b — tissue resistance force vs. time (solid lines: experimental data, dashed line: calculation results)

скоростью (рис. 4, a) индентировалась канюля радиусом $R = 0,0009$ м. После достижения заданной глубины внедрения положение канюли фиксировалось.

В процессе эксперимента с помощью датчика усилия регистрировалась осевая сила сопротивления ткани $P(t)$. Пример экспериментальных зависимостей осевой силы от времени представлен на рис. 4, b черной и серой сплошными кривыми.

Для расчета $P(t)$ воспользуемся формулой (12). Методом экспертной оценки (аналогично работам [19, 20]) были выбраны следующие параметры предложенной модели контактного взаимодействия ($n = 2$):

$$E_1 = 5000 \text{ Па}; E_2 = 23 \text{ 000 Па}; T_\sigma^{(1)} = 9 \text{ с};$$

$$T_\sigma^{(2)} = 0,7 \text{ с}; T_\varepsilon^{(2)} = 5T_\sigma^{(1)}; T_\varepsilon^{(2)} = 15T_\sigma^{(2)}.$$

На рис. 4, b штриховой линией показан результат расчета осевой нагрузки $P(t)$ для выбранного набора параметров.

Видно, что при выбранных значениях параметров результаты расчета достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Численное моделирование

Теперь проведем численное моделирование процесса индентирования в мягкую ткань. Целью индентирования будем считать достижение некоторой заданной глубины x^* погружения индентора в ткань.

При решении этой динамической задачи воспользуемся уравнениями (5) для определения величин $p_{1,2}$.

Как отмечалось выше, при внедрении индентора в форме цилиндра с плоским основанием величины p_i и u_z не зависят от r , причем $a = R$. Соответственно, из выражения (10) получаем следующую формулу для силы P :

$$P = \pi R^2(p_1 + p_2). \quad (13)$$

Поскольку в этом случае $u_z = x$, уравнения (5) принимают следующий вид:

$$T_{\sigma}^{(i)} \dot{p}_i = -p_i + \frac{E_i}{(1-\nu^2)h} (x + T_{\varepsilon}^{(i)} \dot{x}), \quad i = 1, 2. \quad (14)$$

Сила, создаваемая ПЭП, является управлением. Будем задавать ее в виде обратной связи по текущей глубине погружения и скорости индентора, учитывая, что сила, развиваемая ПЭП, не может превышать (по абсолютной величине) указанного ранее значения F_{\max} :

$$F = \begin{cases} -F_{\max}, & \text{при } F_* - K(x - x_*) - H\dot{x} < -F_{\max}; \\ F_* - K(x - x_*) - H\dot{x}, & \text{при} \\ -F_{\max} < F_* - K(x - x_*) - H\dot{x} < F_{\max}; \\ F_{\max}, & \text{при } F_* - K(x - x_*) - H\dot{x} > F_{\max}. \end{cases} \quad (15)$$

Здесь F_* — сила, соответствующая внедрению на целевую глубину. Она определяется уравнением

$$F_* = \frac{\pi R^2}{(1-\nu^2)h} \sum_{i=1}^2 E_i x_*.$$

Будем выбирать частоту ω так, чтобы обеспечить необходимое значение управляющей силы. С учетом введенных ограничений это всегда возможно сделать. Тогда динамика системы "индентор + вязкоупругая ткань" описывается системой (1), (14) вместе с соотношениями (13), (15).

Исследуем влияние коэффициентов обратной связи K и H на процесс выхода на целевую глубину погружения.

На рис. 5 представлены зависимости глубины внедрения от времени при разных значениях целевой глубины x_* и разных значениях параметров K и H .

Видно, что увеличение K ведет к ускорению процесса выхода на целевое значение x . Однако при этом возникают колебания, так что на определенных участках траектории может наблюдаться даже движение индентора в обратном направлении. Амплитуда этих колебаний растет с ростом x_* .

Кроме того, возможно возникновение переуправления, когда индентор проникает на глубину, превышающую целевую. При реальной эксплуатации это нежелательно.

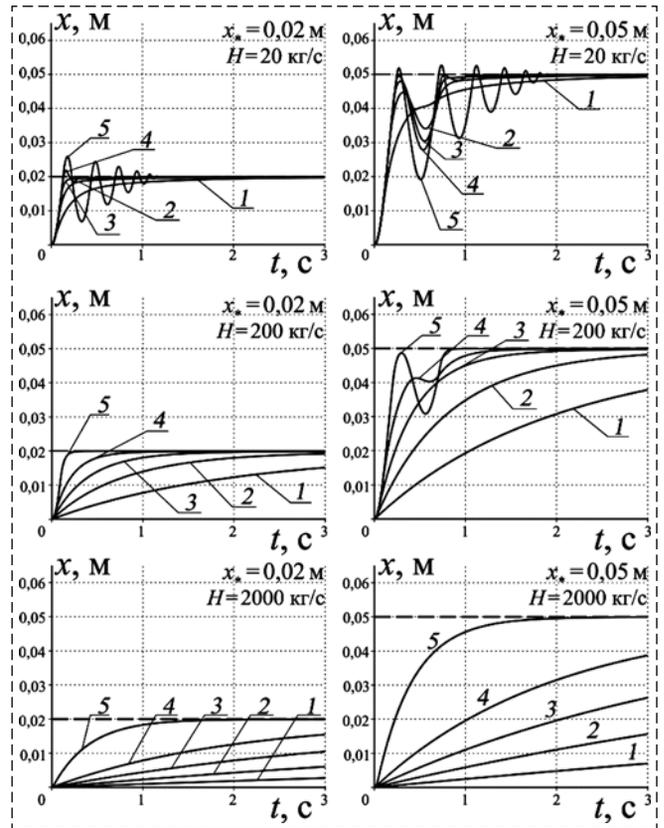


Рис. 5. Зависимость глубины внедрения от времени при разных значениях коэффициентов обратной связи:

1 — $K = 100$ Н/м; 2 — $K = 250$ Н/м; 3 — $K = 500$ Н/м; 4 — $K = 1000$ Н/м; 5 — $K = 5000$ Н/м

Fig. 5. Indentation depth vs. time for different values of feedback coefficients:

1 — $K = 100$ N/m; 2 — $K = 250$ N/m; 3 — $K = 500$ N/m; 4 — $K = 1000$ N/m; 5 — $K = 5000$ N/m

Увеличение H позволяет уменьшить амплитуду таких колебаний или вообще избежать их возникновения, но при этом несколько возрастает время выхода на целевую глубину.

Выводы

Рассмотрена робототехническая система, внедряющая иглу (канюлю) в мягкую биологическую ткань. В качестве двигателя используется ПЭП.

Предложена конечномерная математическая модель системы. Для описания контакта канюли с мягкой тканью разработана математическая модель их взаимодействия. Изготовлен фантом головного мозга свиньи. Проведены эксперименты с индентированием канюли в тело фантома. На основе проведенных экспериментов разработана процедура идентификации параметров модели контакта.

Предложен алгоритм управления ПЭП, обеспечивающий внедрение канюли в мягкую био-

логическую ткань на заданную глубину. Проведено численное моделирование внедрения канюли в мягкую ткань с использованием такого алгоритма.

Список литературы

1. **Stoianovici D. et al.** Multi-Imager Compatible, MR Safe, Remote Center of Motion Needle-Guide Robot // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2018. 65 (1). P. 165–177. Doi: 10.1109/TBME.2017.2697766.
2. **Park Y. L., et al.** Real-Time Estimation of 3-D Needle Shape and Deflection for MRI-Guided Interventions // IEEE ASME Trans Mechatron. 2010. 15(6). P. 906–915.
3. **McPherson T., Ueda J.** A force and displacement self-sensing piezoelectric MRI-compatible tweezer end effector with an on-site calibration procedure // IEEE/ASME Trans. Mechatron. 2014. 19 (2) P. 755–764.
4. **Lorenzo D. D., Momi E. D., Dyagilev I., Manganelli R., Formaglio A., Prattichizzo D., Shoham M., Ferrigno G.** Force feedback in a piezoelectric linear actuator for neurosurgery // Int. J. Med. Robot. 2011. 7 (3). P. 268–275.
5. **Cappelleri D. J., Frecker M. I., Simpson T. W., Snyder A.** Design of a PZT bimorph actuator using a metamodel-based approach // J. Mech. Des. 2002. 124 (2). P. 354–357.
6. **Yeh C.-H. et al.** Application of piezoelectric actuator to simplified haptic feedback system // Sensors and Actuators A: Physical. 2020. 303. 111820. doi:10.1016/j.sna.2019.111820.
7. **Wurpts W., Twiefel J.** An ultrasonic motor with intermittent contact modeled as a two degree of freedom oscillator in time domain // PAMM. 2009. Vol. 9. P. 287–288; doi: 10.1002/pamm.200910117.
8. **Mashimo T., Terashima K.** Dynamic analysis of an ultrasonic motor using point contact model // Sensors and Actuators A: Physical. 2015. Vol. 233. P. 15–21. doi: 10.1016/j.sna.2015.05.009.
9. **Досаев М. З., Селюцкий Ю. Д., Е Ч. С., Су Ф. Ч.** Моделирование тактильной обратной связи, реализуемой с помощью пьезоэлектрического привода // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 7. С. 480–485. doi: 10.17587/mau.19.480-485.
10. **Sabarianand D. V., Karthikeyan P., Muthuramalingam T.** A review on control strategies for compensation of hysteresis and creep on piezoelectric actuators based micro systems // Mechanical Systems and Signal Processing. 2020. 140, 106634, DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.106634.
11. **Patil S., Burgner-Kahrs J., Webster R., Alterovitz R.** Needle Steering in 3-D Via Rapid Replanning. // IEEE Transactions on Robotics. 2014. 30, P. 853–864. DOI: 10.1109/TRO.2014.2307633.
12. **Onishi T., Ishido R., Takimoto T., Saito K., Uebayashi S., Takahashi M., Ito K.** Biological Tissue-Equivalent Agar-Based Solid Phantoms and SAR Estimation Using the Thermographic Method in the Range of 3–6 GHz // IEICE Transactions on Communications. 2005. 88-B(9). P. 3733–3741.
13. **Aranda-Lara L., Torres-Garcia E., Oros-Pantoja R.** Biological Tissue Modeling with Agar Gel Phantom for Radiation Dosimetry of ^{99m}Tc // Open Journal of Radiology. 2014. N. 4. P. 44–52. http://dx.doi.org/10.4236/ojrad.2014.41006
14. **Oldfield M., Dini D., Giordano G., Rodriguez y Baena F.** Detailed finite element modelling of deep needle insertions into a soft tissue phantom using a cohesive approach // Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering. 2013. 16(5), P. 530–543, DOI: 10.1080/10255842.2011.628448.
15. **Argatov I., Mishuris G.** An analytical solution for a linear viscoelastic layer loaded with a cylindrical punch: evaluation of the rebound indentation test with application for assessing viability of articular cartilage // Mech. Res. Commun. 2011. 38 (2011). P. 565–568.
16. **Argatov I.** An analytical solution of the rebound indentation problem for an isotropic linear viscoelastic layer loaded with a spherical punch // Acta Mech. 2012. 223. P. 1441–1453.
17. **Lyubicheva A.** Closed-Form Solution of Axisymmetric Contact Problem for a Viscoelastic Base within Cycle of Increasing and Decreasing of Load on the Indenter // Journal of Friction and Wear. 2017. 38(2). P. 138–143.
18. **Liu Z., Yao Z., Li X., Fu Q.** Design and experiments of a linear piezoelectric motor driven by a single mode // Review of Scientific Instruments. 2016. 87. 115001; doi: 10.1063/1.4966251.
19. **Klimina L., Shalimova E., Dosaev M., Garziera R.** Closed dynamical model of a double propeller HAWT // Procedia engineering. 2017. 199. P. 577–582.
20. **Selyutskiy Y. D., Klimina L. A.** Effect of nonlinear electromechanical interaction upon wind power generator behavior // AIP Conference Proceedings. 2014. 1637 (1). P. 982–987.

Control of Insertion of Indenter into Viscoelastic Tissue using a Piezoelectric Drive

I. G. Goryacheva^{1,2}, goryache@ipmnet.ru, **M. Z. Dosaev**¹, dosayev@imec.msu.ru, **Y. D. Selyutskiy**¹, seliutski@imec.msu.ru, **A. A. Yakovenko**³, dolgopup_13@mail.ru, **C.-H. Hsiao**³, n16061480@mail.ncku.edu.tw, **C.-Y. Huang**³, gordon168999@yahoo.com.tw, **M.-S. Ju**³, msju@mail.ncku.edu.tw, **C.-H. Yeh**³, longerplus@gmail.com,

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119192, Russian Federation,

²Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, 119526, Russian Federation,

³National Cheng Kung University, Tainan, 701, Taiwan

Corresponding author: Dosaev Marat Z., Ph.D., Leading Researcher, Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University, 119192, Moscow, Russia, e-mail: dosayev@imec.msu.ru

Accepted on February 10, 2020

Abstract

Stereotactic operations are actively used in modern minimally invasive medicine. During such operations, a flexible needle is inserted into the internal organs, with the help of which a biopsy or a local treatment is performed. The applica-

tion of such approaches in neurosurgery requires the accurate positioning of the needle tip at the target point. The present study is related to the creation of a robotic system that delivers the needle to a given point and uses drives compatible with magnetic resonance imaging devices that visualize the position of the needle. In this paper, we propose a finite-dimensional mathematical model of a mechatronic system that uses a piezoelectric drive (PED) to move the needle (cannula) along a given line. To describe the contact between the cannula and the soft tissue, a mathematical model of their interaction is developed. The contact problem involving two processes occurring during the introduction of the needle into the biological tissue is solved: the introduction of a rigid (compared to the tissue) indenter and its retention at a certain depth. Relaxation properties of the tissue are taken into account. The behavior of tissue is described using a phenomenological approach based on a modified Kelvin-Voigt model. This allowed for reducing the solution of the contact problem to the integration of a system of ordinary differential equations. One of recognized ways to develop medical robotic systems is to test their functioning using phantoms of biological tissues. For this purpose, a phantom of a porcine brain based on agar-agar is made. Experiments are carried out to indent a standard cannula into the phantom body. Based on the obtained experimental data, the parameters of the contact model are identified. An algorithm is proposed for controlling the PED frequency, which ensures the introduction of the cannula into the soft biological tissue to a given depth. Numerical simulation of the insertion of the cannula into the soft tissue using this algorithm is performed. The influence of feedback coefficients on the position and speed of the indenter on the nature of the implementation process is investigated.

Keywords: stereotactic operation, piezoelectric actuator, mathematical model, contact characteristics, control algorithm

Acknowledgements: This article was supported by Russian Foundation for Basic Research (project #19-58-52004) and Taiwan Ministry of Science and Technology (project # MOST 108-2923-E-006 -003-MY3).

For citation:

Goryacheva I. G., Dosaev M. Z., Selyutskiy Yu. D., Yakovenko A. A., Hsiao C.-H., Huang C.-Yu., Ju M.-S., Yeh C.-H. Control of Insertion of Indenter into Viscoelastic Tissue using a Piezoelectric Drive, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 5, pp. 304–311.

DOI: 10.17587/mau.21.304-311

References

1. Stoianovici D. et al. Multi-Imager Compatible, MR Safe, Remote Center of Motion Needle-Guide Robot, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2018, 65 (1), pp. 165–177, doi: 10.1109/TBME.2017.2697766.
2. Park Y. L. et al. Real-Time Estimation of 3-D Needle Shape and Deflection for MRI-Guided Interventions, *IEEE ASME Trans Mechatron.*, 2010, 15(6), pp. 906–915.
3. McPherson T., Ueda J. A force and displacement self-sensing piezoelectric MRI-compatible tweezer end effector with an on-site calibration procedure, *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, 2014, 19 (2), pp. 755–764.
4. Lorenzo D. D., Momi E. D., Dyagilev I., Manganelli R., Formaglio A., Praticchizzo D., Shoham M., Ferrigno G. Force feedback in a piezoelectric linear actuator for neurosurgery, *Int. J. Med. Robot.*, 2011, 7 (3), pp. 268–275.
5. Cappelleri D. J., Frecker M. I., Simpson T. W., Snyder A. Design of a PZT bimorph actuator using a metamodel-based approach, *J. Mech. Des.*, 2002, 124 (2), pp. 354–357.
6. Yeh C.-H. et al. Application of piezoelectric actuator to simplified haptic feedback system, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 303, 111820, doi:10.1016/j.sna.2019.111820.
7. Wurpts W., Twiefel J. An ultrasonic motor with intermittent contact modeled as a two degree of freedom oscillator in time domain, *PAMM*, 2009, vol. 9, pp. 287–288, doi: 10.1002/pamm.200910117.
8. Mashimo T., Terashima K. Dynamic analysis of an ultrasonic motor using point contact model, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, vol. 233, pp. 15–21, doi: 10.1016/j.sna.2015.05.009.
9. Dosaev M. Z., Selyutskiy Yu. D., Yeh C.-H., Su F.-C. Modeling Tactile Feedback Realized by Piezoelectrical Actuator, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 7, pp. 480–485 (in Russian), doi: 10.17587/mau.19.480-485.
10. Sabarianand D. V., Karthikeyan P., Muthuramalingam T. A review on control strategies for compensation of hysteresis and creep on piezoelectric actuators based micro systems, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 140, 106634, doi: 10.1016/j.ymsp.2020.106634.
11. Patil S., Burgner-Kahrs J., Webster R., Alterovitz R. Needle Steering in 3-D Via Rapid Replanning, *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, 30, pp. 853–864, doi: 10.1109/TRO.2014.2307633.
12. Onishi T., Ishido R., Takimoto T., Saito K., Uebayashi S., Takahashi M., Ito K. Biological Tissue-Equivalent Agar-Based Solid Phantoms and SAR Estimation Using the Thermographic Method in the Range of 3–6 GHz, *IEICE Transactions on Communications*, 2005, 88-B(9), pp. 3733–3741.
13. Aranda-Lara L., Torres-García E., Oros-Pantoja R. Biological Tissue Modeling with Agar Gel Phantom for Radiation Dosimetry of ^{99m}Tc, *Open Journal of Radiology*, 2014, 4, pp. 44–52, available at: <http://dx.doi.org/10.4236/ojrad.2014.41006>.
14. Oldfield M., Dini D., Giordano G., Rodriguez y Baena F. Detailed finite element modelling of deep needle insertions into a soft tissue phantom using a cohesive approach, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2013, 16:5, pp. 530–543, doi: 10.1080/10255842.2011.628448.
15. Argatov I., Mishuris G. An analytical solution for a linear viscoelastic layer loaded with a cylindrical punch: evaluation of the rebound indentation test with application for assessing viability of articular cartilage, *Mech. Res. Commun.*, 2011, 38 (2011), pp. 565–568.
16. Argatov I. An analytical solution of the rebound indentation problem for an isotropic linear viscoelastic layer loaded with a spherical punch, *Acta Mech.*, 2012, 223, pp. 1441–1453.
17. Lyubicheva A. Closed-Form Solution of Axisymmetric Contact Problem for a Viscoelastic Base within Cycle of Increasing and Decreasing of Load on the Indenter, *Journal of Friction and Wear*, 2017, 38(2), pp. 138–143.
18. Liu Z., Yao Z., Li X., Fu Q. Design and experiments of a linear piezoelectric motor driven by a single mode, *Review of Scientific Instruments*, 2016, vol. 87, 115001, doi: 10.1063/1.4966251.
19. Klimina L., Shalimova E., Dosaev M., Garziera R. Closed dynamical model of a double propeller HAWT, *Procedia engineering*, 2017, 199, pp. 577–582.
20. Selyutskiy Y. D., Klimina L. A. Effect of nonlinear electromechanical interaction upon wind power generator behavior, *AIP Conference Proceedings*, 2014, 1637 (1), pp. 982–987.

А. И. Глушченко, канд. техн. н., доц., strondutt@mail.ru, **В. А. Петров**, ассистент, 79040882508@ya.ru,
К. А. Ласточкин, студент, lastconst@yandex.ru,

Старооскольский технологический институт им. А. А. Угарова (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", г. Старый Оскол

Разработка адаптивной системы управления балансирующим роботом на основе второго метода Ляпунова с переменным шагом настройки¹

Решается задача управления двухколесными балансирующими роботами. Рассматриваемый класс объектов характеризуется неустойчивостью и наличием в математическом описании нескольких видов нелинейностей за счет возведения фазовых координат в степень и применения к ним тригонометрических функций. Более того, при прикладном использовании подобных объектов происходят изменения значений их параметров (массы, положения центра масс и коэффициента трения колес о дорожную поверхность), что в целом и определяет необходимость применения адаптивных алгоритмов управления. Существующие на сегодняшний день системы управления балансирующими роботами (а в большинстве случаев это оптимальные LQ-алгоритмы и ПИД регуляторы) не способны обеспечить компенсацию существенных параметрических возмущений, хотя и обладают определенной робастностью по отношению к ним. Для решения этой проблемы в работе предлагается система адаптивного управления, основанная на втором методе Ляпунова и использовании эталонной модели. Для построения такого адаптивного регулятора в исследовании: 1) получено математическое описание эталонной динамики робота (при номинальных значениях его параметров); 2) согласно теории оптимального управления выполнен расчет регулятора состояний; 3) на основе второго метода Ляпунова разработан контур адаптации параметров полученного регулятора, не требующий в процессе работы знания модели объекта. Полученный контур адаптации дополнен переменной скоростью подстройки коэффициентов, которая пересчитывается на основании информации о текущем и предыдущем значениях задания по координатам состояния робота. Экспериментальная проверка адаптивного регулятора проведена на математической и физической моделях балансирующего робота. При проведении экспериментов на математической модели масса робота была увеличена от двух до 13,5 раз, на физической модели масса была увеличена в два раза. Результаты экспериментов показывают эффективность разработанной системы по сравнению с оптимальным LQ-регулятором с точки зрения интегрально-квадратичного показателя качества.

Ключевые слова: балансирующий робот, адаптивное управление, параметрическая адаптация, LQ-регулятор, эталонная модель, второй метод Ляпунова, шаг настройки, интегрально-квадратичный показатель качества

Введение

Рассматриваемым объектом управления в исследовании является двухколесный балансирующий робот, представимый в виде перевернутого маятника на тележке. При построении системы управления подобными объектами необходимо учитывать их особенности, а именно: многомерность, неустойчивость, нелинейность и нестационарность [1, 2]. Существующие способы управления двухколесными роботами в подавляющем большинстве случаев строятся на основе его линеаризованной модели методами оптимального или ПИД управления [3, 4], при этом коэффициенты таких регуляторов в процессе работы не перенастраиваются [5]. Такие подходы способны гарантировать достижение целей управления только в некоторой малой окрестности точки линеаризации (как правило, ею является точка неустойчивого равновесия) [6]. Кроме того, такие регуляторы не способны обе-

спечить одинаково высокое качество переходных процессов при значительном изменении параметров объекта [7]. Однако для использования балансирующих роботов и подобных неустойчивых объектов в прикладных задачах человеческой деятельности необходимо обеспечить эффективное управление в более широком диапазоне изменений параметров [8, 9].

Добиться этого возможно путем применения методов адаптивного управления. Исключив из рассмотрения подходы, требующие наличия точной модели объекта управления, поскольку для неустойчивого объекта проведение идентификации в режиме реального времени является нетривиальной задачей, рассмотрим методы, основанные на использовании эталонной модели [10, 11]. Так как рассматриваемый робот является изначально неустойчивым объектом, то вопрос обеспечения его стабилизации является первичным. В связи с этим перспективным представляется применение группы подходов, основанных на втором методе Ляпунова [12, 13]. Проведенный анализ работ позволил обнаружить исследования, посвященные их применению для стабилизации достаточно сложных

¹Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-47-310003-р_а).

объектов — летательных аппаратов, в частности, для решения задачи Wing Rock [14, 15].

В данном исследовании указанный выше подход был адаптирован и усовершенствован для дальнейшего применения на балансирующем роботе. В частности, регулятор, предлагаемый в данной статье, способен работать с изначально неустойчивыми объектами, для своей работы не требует знания модели объекта, а также выполняет коррекцию коэффициентов регулятора не только в режиме стабилизации, но и в режиме слежения.

Построение предлагаемой адаптивной системы включает в себя следующие этапы: 1) расчет по известным физическим характеристикам робота его математической модели в пространстве координат состояний; 2) определение на ее основе параметров LQ-регулятора для номинального состояния робота; 3) разработка подсистемы настройки параметров такого регулятора (начиная с упомянутых номинальных) с использованием второго метода Ляпунова; 4) построение алгоритма расчета скорости настройки с помощью информации о текущем и предыдущем значениях задания по координатам состояния робота.

Описание балансирующего робота

Кинематическая схема балансирующего робота, для которого в работе строится адаптивная система управления, представлена на рис. 1.

Математическое описание рассматриваемого балансирующего робота было получено с использованием приведенной кинематической схемы с помощью второго метода Эйлера—Лагранжа [16]. После линеаризации в точке неустойчивого положения равновесия система дифференциальных уравнений, описывающих балансирующий робот, может быть записана в виде

$$\begin{cases} ((2m + M)R^2 + 2J_w + 2n^2J_m)\ddot{\theta} + (MLR - 2n^2J_m)\ddot{\psi} = \\ = \alpha(v_l + v_r) - 2(\beta + f_w)\dot{\theta} + 2\beta\dot{\psi}; \\ (MLR - 2n^2J_m)\ddot{\theta} + (ML^2 + J_w + 2n^2J_m)\ddot{\psi} - MgL\psi = \\ = \alpha(v_l + v_r) + 2\beta\dot{\theta} - 2\beta\dot{\psi}; \\ \left[\frac{1}{2}mW^2 + J_\phi + \frac{W^2}{2R^2}(J_w + n^2J_m) \right] \ddot{\phi} = \\ = \frac{W}{2R}\alpha(v_l + v_r) - \frac{W^2}{2R^2}(\beta + f_w)\dot{\phi}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь α и β вычисляются как $\alpha = nK_t/R_m$; $\beta = nK_tK_b/R_m + f_m$. В дальнейшем опыты будут проводиться на балансирующем роботе на платформе LEGO EV3. Поэтому описание

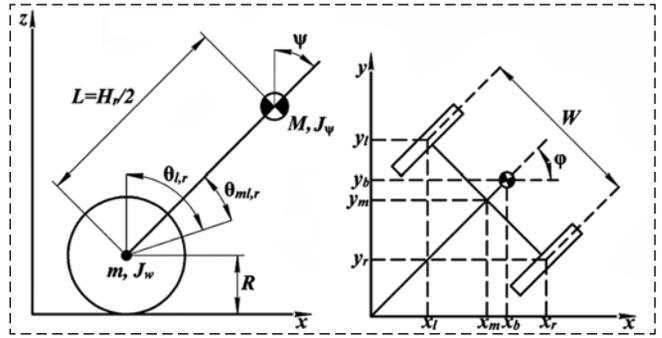


Рис. 1. Кинематическая схема балансирующего робота
Fig. 1. Balancing robot kinematic diagram

параметров приводится с конкретными значениями для указанного робота; R — радиус колеса (0,027 м); m — масса колеса (0,024 кг); L — расстояние от оси колеса до центра масс; M — масса тела робота (0,8 кг); H_r — высота робота (0,21 м); ψ — угол отклонения тела робота от нормали; $\theta_{l,r}$ — угол поворота колеса (левого/правого); $\theta_{ml,r}$ — угол поворота электропривода (левого/правого); ϕ — угол поворота тела робота от нормали; W — ширина робота (0,105 м); $J_\psi = 0,083M(W^2 + D^2)$ — момент инерции тела робота; $J_\psi = 0,33ML^2$ — момент инерции тангажа; J_m — момент инерции двигателя постоянного тока (10^{-5} кг·м²); $J_w = 0,5mR^2$ — момент инерции колеса; n — передаточное число (один); K_t — постоянная момента двигателя постоянного тока (0,317 Н·м/А); K_b — постоянная противоЭДС двигателя постоянного тока (0,468 В·с/рад); f_m — коэффициент трения между телом и двигателем постоянного тока (0,0022); f_w — коэффициент трения между колесом и поверхностью (ноль); R_m — сопротивление двигателя постоянного тока (6,69 Ом); v_r, v_l — напряжения на левом и правом электродвигателях.

Обобщенными координатами, которыми описывается балансирующий робот, являются θ — средний угол поворота колес ($\theta = 0,5(\theta_l + \theta_r)$); $\dot{\theta}$ — скорость поворота колес; ψ — угол отклонения тела робота от нормали; $\dot{\psi}$ — скорость отклонения тела робота от нормали; ϕ — угол поворота робота относительно нормали; $\dot{\phi}$ — скорость поворота робота относительно нормали. Задача управления балансирующим роботом заключается в стабилизации неустойчивой динамики по координатам ψ и $\dot{\psi}$ при одновременной организации слежения за заданиями по координатам $\theta, \dot{\theta}$ и $\phi, \dot{\phi}$.

Выполнив перевод системы дифференциальных уравнений (1) в форму Коши, представим математическую модель балансирующего робота в пространстве координат состояний:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu; \\ y = Cx, \end{cases} \quad (2)$$

где $A \in R^{6 \times 6}$, $B \in R^{6 \times 2}$, $C \in R^{6 \times 6}$, сами матрицы приведены в работах [17, 18]. С использованием полученной модели балансирующего робота в пространстве координат состояний (2) выполним построение адаптивной системы управления.

Построение адаптивной системы управления

Построение адаптивной системы предлагается выполнить в соответствии с группой методов управления с параллельной эталонной моделью [10, 11]. В такой системе алгоритм адаптации коэффициентов необходимо получить по второму методу Ляпунова, так как требование к обеспечению устойчивости балансирующего робота является первичным. Структурная схема предлагаемой системы адаптивного управления представлена на рис. 2. Она состоит из блока эталонной модели, объекта управления, блока адаптера, реализующего алгоритм вычисления коррекции коэффициентов регулятора, и блока регулятора, вычисляющего на своем выходе управляющее воздействие для объекта управления по ошибке слежения за уставкой.

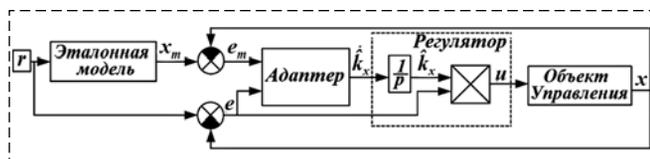


Рис. 2 Структурная схема адаптивной системы управления
Fig. 2. Adaptive control system block diagram

Здесь r — вектор задания по координатам объекта; x — значения координат состояния робота; x_m — значения координат состояния эталонной модели; \hat{k}_x — коррекции коэффициентов регулятора; k_x — текущие коэффициенты регулятора; e — рассогласование между выходом объекта и заданием; e_m — рассогласование между выходами объекта и эталонной модели; u — управляющие воздействие.

Далее рассмотрим поэтапно расчет основных составляющих адаптивной системы управления.

Эталонная модель и LQ-регулятор. Расчет эталонной модели традиционно выполняется путем расположения корней характеристического полинома замкнутой системы исходя из предъявляемых требований по устойчивости и качеству переходных процессов объекта управления [19]. Для балансирующего робота, многомерного объекта, описываемого шестью координатами состояния и двумя управлениями, необходимо предъявление таких требований сразу по всем координатам, что значительно усложняет

расчет эталонной модели указанным способом. В данной работе она получена иным путем.

Начальные параметры робота в уравнении (1) измерены с достаточно высокой точностью и являются для него номинальными. Тогда переходные процессы, возникающие в системе при таких параметрах, являются эталонными по отношению к любым другим переходным процессам. Однако балансирующий робот является неустойчивым объектом и требует стабилизации. Поэтому в качестве эталонной модели робота примем замкнутую систему, состоящую из математической модели робота (2) при номинальных параметрах и LQ-регулятора, рассчитанного для стабилизации системы с такими параметрами. Исходная модель объекта в пространстве координат состояний (2) описывается тремя углами θ, ψ, ϕ и их производными $\dot{\theta}, \dot{\psi}, \dot{\phi}$. Соответственно, регулятор состояния, построенный для этих состояний, является статическим (пропорционально-дифференциальным). Для повышения порядка астатизма замкнутой системы в математическое описание объекта была добавлена дополнительная координата θ_{int} , являющаяся интегралом от θ по времени. Поэтому вектор состояний имеет вид $x = [x_{\theta int} \ x_{\theta} \ x_{\psi} \ x_{\dot{\theta}} \ x_{\dot{\psi}} \ x_{\phi} \ x_{\dot{\phi}}]$. Соответственно, имеется вектор заданий по координатам $r = [r_{\theta int} \ r_{\theta} \ r_{\psi} \ r_{\dot{\theta}} \ r_{\dot{\psi}} \ r_{\phi} \ r_{\dot{\phi}}]$.

Расчет матричного коэффициента усиления LQ-регулятора проведен на основании модели объекта в пространстве координат состояний (2) путем минимизации квадратичного критерия

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (e^T Q e + u^T R u) dt \rightarrow \min. \quad (3)$$

Вектор рассогласований имеет вид

$$e = r - x = [e_{\theta int} \ e_{\theta} \ e_{\psi} \ e_{\dot{\theta}} \ e_{\dot{\psi}} \ e_{\phi} \ e_{\dot{\phi}}].$$

Здесь $Q \in R^{7 \times 7}$ и $R \in R^{2 \times 2}$ — положительно определенные единичные матрицы. Закон управления, удовлетворяющий критерию (3), можно записать в виде

$$u = -R^{-1} B^T P e = K e, \quad (4)$$

где $e \in R^{7 \times 1}$ — вектор рассогласования по семи координатам.

Матрица P найдена из решения уравнения Риккати

$$P A + A^T P + Q - P B R^{-1} B^T P = 0. \quad (5)$$

Таким образом, матрица $K \in R^{2 \times 7}$ и имеет вид

$$K = \begin{bmatrix} 0,6437 & 1,2418 & 59,3784 & 1,3906 & 7,1009 & 0,6770 & 0,1790 \\ 0,6437 & 1,2418 & 59,3784 & 1,3906 & 7,1009 & -0,6770 & -0,1790 \end{bmatrix}.$$

Тогда эталонная модель описывается представленным ниже уравнением для замкнутой системы "объект + регулятор", выходом которой является вектор $x_m = [x_{m\theta \text{ int}} \ x_{m\theta} \ x_{m\psi} \ x_{m\dot{\theta}} \ x_{m\dot{\psi}} \ x_{m\varphi} \ x_{m\dot{\varphi}}]$:

$$\begin{cases} \dot{x}_m = Ax_m + Bu; \\ y_m = Cx_m, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_m = Ax_m + BKe; \\ y_m = Cx_m, \end{cases} \Rightarrow \\ \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_m = (A - BK)x_m + BKr; \\ y_m = Cx_m, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_m = A_m x_m + B_m r; \\ y_m = Cx_m. \end{cases} \quad (6)$$

Закон управления и адаптация его параметров. Для ввода идеальных и реальных коэффициентов регулятора получим уравнение в отклонениях. Для этого вычтем из уравнения эталонной модели (6) уравнение объекта управления (2), затем добавим и вычтем величину $A_m x$. Вектор e_m имеет вид:

$$e_m = x_m - x = [e_{m\theta \text{ int}} \ e_{m\theta} \ e_{m\psi} \ e_{m\dot{\theta}} \ e_{m\dot{\psi}} \ e_{m\varphi} \ e_{m\dot{\varphi}}]; \quad (7) \\ \dot{e}_m = A_m x_m + B_m r - Ax - Bu + (A_m x - A_m x).$$

После группировки выражение (7) можно записать в виде

$$\dot{e}_m = A_m e_m + (A_m - A)x + B_m r - Bu. \quad (8)$$

Условием разрешимости задачи синтеза является совпадение переходных процессов робота и переходных процессов его эталонной модели, т. е. $e_m = 0$. Тогда выразим из уравнения (8) управление u :

$$Bu = (A_m - A)x + B_m r; \\ u^* = B^+ (A_m - A)x + B^+ B_m r = k_x^* x + k_r^* r, \quad (9)$$

где $B^+ = (B^T B)^{-1} B^T$ — матрица, псевдообратная матрице B ; $k_x^* = B^+ (A_m - A)$ и $k_r^* = B^+ (B_m)$ — идеальные параметры регулятора. Закон управления (9) физически нереализуем ввиду необходимости точного измерения матриц A и B в каждый момент времени работы системы. Введем реальный закон управления

$$\hat{u} = \hat{k}_x x + \hat{k}_r r. \quad (10)$$

Подставим реальный закон управления (10) в уравнение в отклонениях (8) и вынесем за скобки матрицу B :

$$\dot{e}_m = A_m e_m + B(B^+ (A_m - A)x + B^+ B_m r - \hat{k}_x x - \hat{k}_r r) \\ \Downarrow \\ \dot{e}_m = A_m e_m + B(\tilde{k}_x x + \tilde{k}_r r). \quad (11)$$

Здесь $\tilde{k}_x = k_x^* - \hat{k}_x$ и $\tilde{k}_r = k_r^* - \hat{k}_r$ — разница между идеальными и реальными коэффициентами регулятора.

Выберем функцию Ляпунова как функцию от параметрического возмущения (ошибки

между выходом объекта и эталонной модели) e_m и разницы между идеальными и реальными коэффициентами регулятора:

$$V = e_m^T H e_m + |B| \left(\frac{1}{2} \tilde{k}_x^T \Gamma_1 \tilde{k}_x + \frac{1}{2} \tilde{k}_r^T \Gamma_2 \tilde{k}_r \right). \quad (12)$$

Здесь Γ_1 и Γ_2 — положительно определенные диагональные матрицы. Матрицу H найдем, решив уравнение Ляпунова

$$A_m^T H + H A_m = -I, \quad (13)$$

где A_m — гурвицева матрица, а I — единичная матрица.

Тогда производную функции Ляпунова можно записать как

$$\dot{V} = e_m^T (H A_m + A_m^T H) e_m + \\ + 2e_m^T H B (\tilde{k}_x x + \tilde{k}_r r) + |B| (\tilde{k}_x^T \Gamma_1 \dot{\tilde{k}}_x + \tilde{k}_r^T \Gamma_2 \dot{\tilde{k}}_r). \quad (14)$$

Производная функции Ляпунова будет отрицательной тогда и только тогда, когда справедливо равенство

$$2e_m^T H B (\tilde{k}_x x + \tilde{k}_r r) + |B| (\tilde{k}_x^T \Gamma_1 \dot{\tilde{k}}_x + \tilde{k}_r^T \Gamma_2 \dot{\tilde{k}}_r) = 0. \quad (15)$$

Уравнение (15) содержит две переменные ($\dot{\tilde{k}}_x$ и $\dot{\tilde{k}}_r$) и, следовательно, становится разрешимым, в частности, если они совпадают. Поэтому для дальнейшего синтеза контура адаптации примем следующие допущения:

- 1) $\Gamma = \Gamma_1 = \Gamma_2$;
- 2) $k_r^* = -k_x^*$ и $k_r = -\hat{k}_x$, тогда и $\tilde{k}_r = -\tilde{k}_x$.

С учетом введенных допущений выражение (15) можно преобразовать к виду

$$-2e_m^T H B \tilde{k}_x e + 2|B| \tilde{k}_x^T \Gamma \dot{\tilde{k}}_x = 0, \quad (16)$$

а регулятор и закон настройки его коэффициентов можно описать уравнениями

$$\hat{u} = \hat{k}_x e; \quad (17)$$

$$\dot{\hat{k}}_x = -\text{sgn } B \cdot \Gamma^{-1} e_m^T H e. \quad (18)$$

Здесь $\dot{\tilde{k}}_x = -\dot{\hat{k}}_x$. Таким образом, реализуя законы управления (17) и адаптации (18), можно гарантировать устойчивость балансирующего робота (ввиду отрицательной производной функции Ляпунова) и сходимости ошибки слежения e_m к нулю при $t \rightarrow \infty$ (ввиду аппроксимации идеального закона управления). Как видно из уравнения (18), алгоритм настройки регулятора не требует знания модели объекта управления в текущий момент времени.

При реализации закона управления (17) и адаптации (18) предполагается, что в начальный момент времени балансирующий робот

описывается уравнениями для своего номинального режима работы. Тогда в качестве начальных значений коэффициентов регулятора будем использовать параметры LQ-регулятора, которые были рассчитаны при синтезе эталонной модели.

Переменный шаг настройки параметров регулятора. Про условия сходимости полученного алгоритма адаптации (18) известно только то, что матрица Γ^{-1} должна быть диагональной и положительно определенной. При практической реализации разработанного алгоритма этого оказывается недостаточно. Возможно, что выбранное значение шага окажется или слишком большим для текущих рассогласований e и e_m или, наоборот, слишком малым. В первом случае это может привести к колебательным переходным процессам по координатам состояния балансирующего робота, а во втором — к слишком затянутым по времени процессам приближения ошибки слежения e_m к нулю. Для решения этой проблемы в работе предлагается алгоритм перерасчета матрицы Γ^{-1} , основанный на информации о текущем задании для робота и задании на прошлом переходном процессе. Заданием для робота при этом является скорость его движения — координата $\dot{\theta}$. Для реализации алгоритма расчета шага адаптации методом ручного перебора при проведении экспериментов на математической модели робота было рассчитано начальное приближение Γ_0^{-1} шага, при котором цель управления выполняется для нулевого задания по скорости движения робота:

$$\Gamma_0^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 251000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,043 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 15 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Далее также экспериментально был установлен вид зависимости матрицы Γ^{-1} от разницы между текущим заданием по $\dot{\theta}$ и заданием на прошлом переходном процессе:

$$\Gamma^{-1} = \frac{\Gamma_0^{-1}}{\gamma(r - r_{old})^2}, \quad (20)$$

где r — текущее задание по скорости движения робота; r_{old} — задание по скорости движения на прошлом переходном процесс; $\gamma = 5$ — коэффициент подстройки (значение выбрано эмпирически).

Алгоритм выбора значения шага адаптации работает следующим образом: если переход-

ный процесс балансирующего робота является первым после его запуска, то в качестве шага используется Γ_0^{-1} , во всех других случаях размер шага настройки рассчитывается по формуле (20). Важной особенностью здесь является то, что значение шага рассчитывается один раз в начале каждого переходного процесса и далее не меняется.

Экспериментальная проверка адаптивной системы

Эксперименты, целью которых являлась проверка работоспособности и анализ эффективности разработанной адаптивной системы управления, были выполнены и на модели робота в MATLAB Simulink, и на реальном роботе на платформе EV3. Сравнение разработанной системы проводили с LQ-регулятором без контура адаптации с параметрами в виде матрицы K , рассчитанной при синтезе эталонной модели. Качество работы регуляторов оценивали по интегралу квадрата ошибки слежения e_m за время эксперимента.

Имитационное моделирование в MATLAB Simulink. На математической модели робота было проведено две серии экспериментов. В первой серии масса робота была увеличена на 0,8 кг (в два раза) относительно номинальной, а во второй на 10 кг (в 13,5 раз). Описанная постановка экспериментов необходима для проверки способности адаптивной системы сводить переходные процессы робота к переходным процессам эталонной модели и при малых, и при существенных изменениях массы. Длительность каждого эксперимента составила 4 с, при этом первые две секунды робот функционировал в режиме стабилизации, а последние две секунды — в режиме отработки единичного задания по координате θ .

В табл. 1 приведены значения интеграла квадрата ошибки слежения e_m по координатам робота под управлением LQ-регулятора и адаптивной системы при изменении массы ро-

Таблица 1
Table 1

Координата	Значение показателя качества			
	Стабилизация		Слежение	
	LQR	Адаптивная система	LQR	Адаптивная система
θ	$9,089 \cdot 10^{-7}$	$8,126 \cdot 10^{-7}$	$5,809 \cdot 10^{-5}$	$2,359 \cdot 10^{-5}$
$\dot{\theta}$	$1,737 \cdot 10^{-4}$	$1,729 \cdot 10^{-4}$	$1,345 \cdot 10^{-3}$	$1,335 \cdot 10^{-3}$
ψ	$4,083 \cdot 10^{-9}$	$2,867 \cdot 10^{-9}$	$7,222 \cdot 10^{-8}$	$1,787 \cdot 10^{-8}$
$\dot{\psi}$	$6,137 \cdot 10^{-6}$	$6,280 \cdot 10^{-6}$	$3,084 \cdot 10^{-5}$	$4,859 \cdot 10^{-5}$

Таблица 2
Table 2

Координата	Значение показателя качества			
	Стабилизация		Слежение	
	LQR	Адаптивная система	LQR	Адаптивная система
θ	$1,143 \cdot 10^{-4}$	$8,709 \cdot 10^{-5}$	$5,71 \cdot 10^{-3}$	$5,191 \cdot 10^{-4}$
$\dot{\theta}$	$1,319 \cdot 10^{-2}$	$9,643 \cdot 10^{-3}$	$1,402 \cdot 10^{-1}$	$2,471 \cdot 10^{-2}$
ψ	$1,087 \cdot 10^{-6}$	$3,214 \cdot 10^{-7}$	$1,511 \cdot 10^{-5}$	$5,924 \cdot 10^{-7}$
$\dot{\psi}$	$3,67 \cdot 10^{-4}$	$3,546 \cdot 10^{-4}$	$2,421 \cdot 10^{-3}$	$9,145 \cdot 10^{-4}$

бота в два раза. Показатель качества отдельно рассчитывался для режима стабилизации и для режима слежения за уставкой по координате $\dot{\theta}$. Качество управления по координатам φ и $\dot{\varphi}$ не оценивалось ввиду малого порядка амплитуд переходного процесса (10^{-16}).

Сравнение данных, приведенных в табл. 1, показывает, что по большинству координат состояния значение интегрального показателя качества снижено за счет применения адаптивного регулятора как в режиме стабилизации, так и в режиме слежения. Переходные процессы по координатам робота в данном случае отличаются друг от друга несущественно и поэтому в тексте статьи не приводятся.

В табл. 2 занесены значения интеграла квадрата ошибки слежения e_m по координатам состояния для обоих регуляторов при проведении эксперимента на модели робота с увеличенной в 13,5 раз массой.

Значения показателя качества показывают, что применение адаптивного регулятора позволяет повысить качество управления с точки зрения интегрально-квадратичного критерия и при большом изменении массы объекта.

На рис. 3 изображено сравнение переходных процессов эталонной модели, объекта под управлением LQ-регулятора и объекта с адаптивной системой при увеличении массы в 13,5 раз. Видно, что адаптивная система управления уменьшает с течением времени ошибку e_m , приводя тем самым переходные процессы балансирующего робота с измененной массой к переходным процессам эталонной модели. В то же время качество переходных процессов робота под управлением LQ-регулятора по сравнению с эталонными заметно ухудшается, что выражено в увеличении амплитуды колебаний относительно эталонной динамики и в режиме стабилизации, и в режиме слежения (на 0,07 рад по ψ , на 0,5 рад по $\dot{\theta}$ и на 0,07 рад по $\dot{\psi}$).

Для проверки способности адаптивной системы работать в режиме слежения в широком диапазоне уставок на модели робота для масс 1,6 и 10,8 кг были проведены эксперименты, в которых значение уставки по скорости движения было не единичным, а составляло от двух до ста радиан за секунду. Также были проведены эксперименты, в которых масса робота изменялась в 3...13 раз. Результаты таких экспериментов аналогичны приведенным на рис. 3.

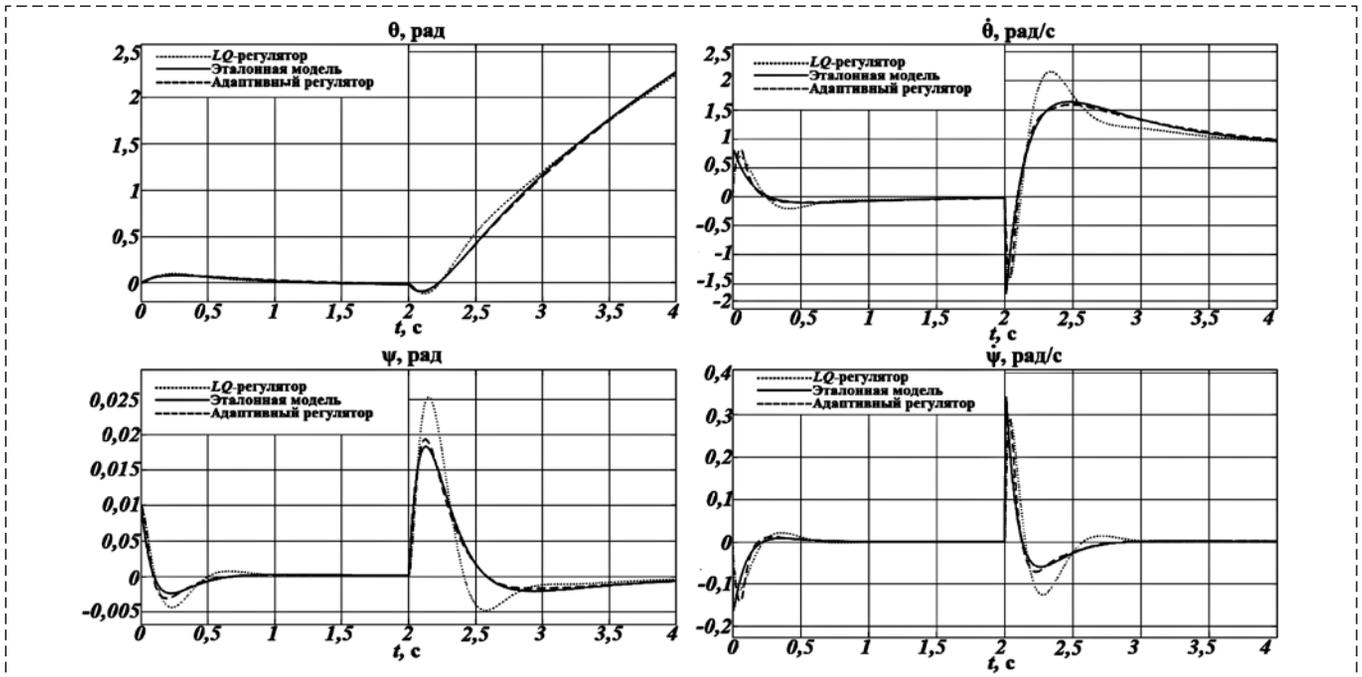


Рис. 3 Переходные процессы для модели балансирующего робота по координатам состояния

Fig. 3. Transients of state coordinates obtained from model of balancing robot

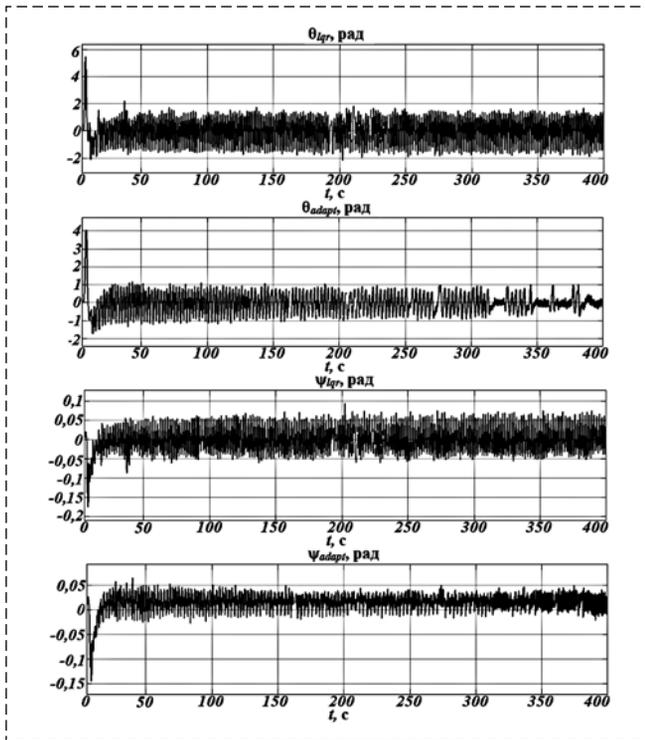


Рис. 4. Сравнение переходных процессов балансирующего робота под управлением адаптивной системы (adapt) и LQ регулятора (lqr) — переменные θ и ψ

Fig. 4. Comparison of transients of balancing robot controlled by adaptive (adapt) and LQ (lqr) regulators — θ and ψ coordinates

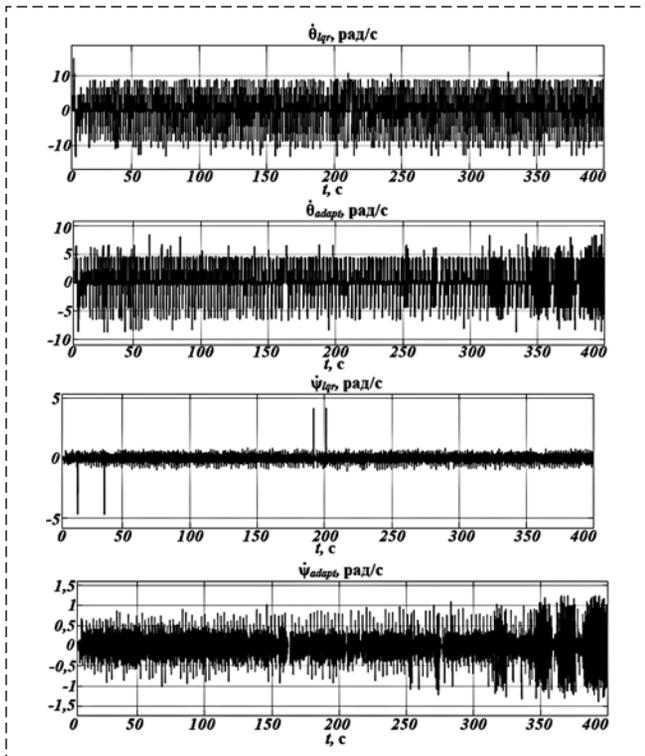


Рис. 5. Сравнение переходных процессов балансирующего робота под управлением адаптивной системы (adapt) и LQ регулятора (lqr) — переменные $\dot{\theta}$ и $\dot{\psi}$

Fig. 5. Comparison of transients of balancing robot controlled by adaptive (adapt) and LQ (lqr) regulators — θ and ψ coordinates

Обе серии экспериментов на модели балансирующего робота свидетельствуют о работоспособности адаптивной системы в режимах стабилизации и слежения и при малом, и при существенном изменении массы робота.

Реализация адаптивной системы на реальном балансирующем роботе. Тестирование системы на реальном балансирующем роботе необходимо для практического подтверждения результатов, полученных в экспериментах на модели. При проведении экспериментов на реальном роботе на платформе LEGO EV3 его масса была увеличена в два раза относительно номинальной путем закрепления грузов. Длительность эксперимента составила 400 с, при этом все время эксперимента объект работал в режиме стабилизации. На рис. 4, 5 представлено сравнение переходных процессов робота под управлением LQ-регулятора и адаптивной системы.

Как и в экспериментах на математической модели робота, оценку качества управления проводили по интегрально-квадратичному показателю качества. В табл. 3 приведены его значения для реального балансирующего робота под управлением LQ-регулятора и адаптивной системы.

Оценка показателя качества управления реальным балансирующим роботом подтверждает результаты, полученные в экспериментах на модели: за счет применения адаптивной системы удалось повысить качество управления по всем координатам состояния робота. На рис. 3 можно увидеть увеличение стабильности объекта под управлением адаптивного регулятора по координатам θ и ψ , выраженное в уменьшении амплитуды колебаний.

Также удалось добиться снижения первых пиков переходных процессов по всем координатам состояния: на 2,7 рад по ψ и на 0,04 рад по ψ . Эти результаты означают выполнение поставленной цели регулирования, заключающейся в сведении к нулю ошибки слежения e_m .

Таблица 3
Table 3

Координата	Значение показателя качества	
	Стабилизация	
	LQR	Адаптивная система
θ	415,8	148,7
$\dot{\theta}$	6018	1789
ψ	0,4298	0,2096
$\dot{\psi}$	26,74	23,49

Заклучение

В исследовании выполнена разработка адаптивной системы управления для двухколесного балансирующего робота. Экспериментальная проверка работоспособности системы проведена и на модели, и на реальном роботе. Обе группы экспериментов демонстрируют способность системы компенсировать широкий диапазон параметрических возмущений, обеспечивая при этом уменьшение интеграла квадрата ошибки слежения за эталонной траекторией. В частности, в серии экспериментов на реальном роботе за счет применения адаптивной системы удалось уменьшить первые пики переходных процессов по сравнению с управлением LQ-регулятора: на 2,7 рад по θ и на 0,04 рад по ψ .

Список литературы

1. **Формальский А. М.** Управление движением неустойчивых объектов. М.: Физматлит, 2012. 232 с.
2. **Li Z., Yang C., Fan L.** Advanced control of wheeled inverted pendulum systems. Springer Science & Business Media, 2012.
3. **Sung H. C.** Balancing Robot Control and Implementation. Master of science thesis. Texas A&M University, 2015. 73 p.
4. **Prasad L. B., Tyagi B., Gupta H. O.** Optimal control of nonlinear inverted pendulum system using PID controller and LQR: performance analysis without and with disturbance input // International Journal of Automation and Computing. 2014. Vol. 11, № 6. P. 661–670.
5. **Chan R. P.M., Stol K. A., Halkyard C. R.** Review of modeling and control of two-wheeled robots // Annual Reviews in Control. 2013. Vol. 37, № 1. P. 89–103.
6. **Ким Д. П.** Теория автоматического управления. Т. 2: Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. М.: Физматлит, 2007. 440 с.
7. **Бобцов А. А., Никифоров В. О., Пыркин А. А.** Методы адаптивного и робастного управления нелинейными объектами в приборостроении. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 277 с.
8. **Astrom K. J., Wittenmark B.** Adaptive control. Courier Corporation, 2013.
9. **Khalil H. K.** Nonlinear control. New York: Pearson, 2015. P. 33–45.
10. **Павлов Б. В., Соловьев И. Г.** Системы прямого адаптивного управления. М.: Наука, 1989. С. 136.
11. **Zhang D., Wei B.** A review on model reference adaptive control of robotic manipulators // Annual Reviews in Control. 2017. Vol. 43. P. 188–198.
12. **Parks P.** Liapunov redesign of model reference adaptive control systems // IEEE Transactions on Automatic Control. 1966. Vol. 11, № 3. P. 362–367.
13. **Аксенов Г. С., Фомин В. Н.** Синтез адаптивных регуляторов на основе метода функции Ляпунова // Автоматика и телемеханика. 1982. № 6. С. 126–137.
14. **Calise A. J., Shin Y., Johnson M. D.** A Comparison Study of Classical and Neural Network Based Adaptive Control of Wing Rock // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. 2004. P. 1–17.
15. **Singh S. N., Yirn W., Wells W. R.** Direct adaptive and neural control of wing-rock motion of slender delta wings // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 1995. Vol. 18, № 1. P. 25–30.
16. **Yamamoto Y.** NXTway-GS Model-Based Design-Control of self-balancing two-wheeled robot built with LEGO Mindstorms NXT. Cybernet Sys. Co., Ltd, 2008.
17. **Глушченко А. И., Петров В. А., Ласточкин К. А.** О применении оперативного обучения для нейросетевого регулятора при управлении двухколесным балансирующим роботом // Системы управления и информационные технологии. 2018. № 3(73). С. 27–32.
18. **Glushchenko A. I., Petrov V. A., Lastochkin K. A.** On Development of Neural Network Controller with Online Training to Control Two-Wheeled Balancing Robot // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE, 2018. P. 1–6.
19. **Zhou K., Doyle J. C., Glover K.** Robust and Optimal Control. Prentice Hall, 1996.

On Development of Two-Wheeled Balancing Robot Adaptive Control System on Basis of Second Lyapunov Approach with Tunable Step Size

A. I. Glushchenko, a.glushchenko@sf-misis.ru, **V. A. Petrov**, 79040882508@ya.ru,
K. A. Lastochkin, lastconst@yandex.ru,

Automated and information control systems department Stary Oskol technological institute n.a. Ugarov (branch)
National University of Science and Technology "MISIS", Stary Oskol, 309516, Russian Federation

Corresponding author: **Glushchenko A. I.**, C. Sc., Associate Professor,
Stary Oskol technological institute n.a. Ugarov (branch) National University of Science and Technology "MISIS",
Stary Oskol, 309516, Russian Federation, e-mail: a.glushchenko@sf-misis.ru

Accepted on December 16, 2019

Abstract

The problem of a two-wheeled balancing robot control is the scope of this research. Such plants are unstable, and their mathematical description includes several types of nonlinearities: rising to the power of the robot state coordinates and the trigonometric functions application. Moreover, such objects are non-stationary, i.e. they change the values of their parameters (mass, position of the center of mass and the coefficient of friction of the wheels on the road surface). The existing control systems of balancing robots (in most cases, these are optimal LQ algorithms and PID controllers) are not able to provide compensation of significant parametric disturbances, although they have a certain robustness with respect to them. All above mentioned problems make it reasonable to apply adaptive control algorithms to such plants. So we propose

an adaptive control system based on the second Lyapunov method and the use of a reference model. To build such an adaptive controller in this study: 1) a mathematical description of the reference dynamics of the robot (at nominal values of its parameters) is made; 2) the LQ regulator parameters are calculated according to the theory of optimal control; 3) an adaptation loop of the parameters of the obtained controller, which does not require the plant model, is developed on the basis of the second Lyapunov method. The resulting adaptation loop is supplemented with a variable step size, which is recalculated on the basis of data about the current and previous values of the reference of the robot state coordinates. Experimental validation of the adaptive controller is made with the help of both mathematical and physical models of the balancing robot. Considering the experiments with the mathematical model, the mass of the robot is increased from two to 13.5 times. As for the physical model, the mass is doubled. The experimental results show the efficiency of the developed system in comparison with the optimal LQ-regulator in terms of the integral quadratic transient quality index.

Keywords: balancing robot, adaptive control, parametric adaptation, LQ regulator, reference model, second Lyapunov approach, step size, integral quadratic transient quality index

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant no. 18-47-310003-p_a)

For citation:

Glushchenko A. I., Petrov V. A., Lastochkin K. A. On Development of Two-Wheeled Balancing Robot Adaptive Control System on Basis of Second Lyapunov Approach with Tunable Step Size, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 5, pp. 312–320.

DOI: 10.17587/mau.21.312-320

References

1. **Formal'skij A. M.** Motion control of unstable objects, Moscow, Fizmatlit, 2012, 232 p. (in Russian).
2. **Li Z., Yang C., Fan L.** Advanced control of wheeled inverted pendulum systems, Springer Science & Business Media, 2012, 217 p.
3. **Sung H. C.** Balancing Robot Control and Implementation. Master of science thesis, *Texas A&M University*, 2015, 73 p.
4. **Prasad L. B., Tyagi B., Gupta H. O.** Optimal control of nonlinear inverted pendulum system using PID controller and LQR: performance analysis without and with disturbance input, *International Journal of Automation and Computing*, 2014, vol. 11, no. 6, pp. 661–670.
5. **Chan R. P.M., Stol K. A., Halkyard C. R.** Review of modeling and control of two-wheeled robots, *Annual Reviews in Control*, 2013, vol. 37, no. 1, pp. 89–103.
6. **Kim D. P.** Automatic control theory. Vol. 2: Multidimensional, nonlinear, optimal and adaptive systems, Moscow, Fizmatlit, 2007, 440 p. (in Russian).
7. **Bobtsov A. A., Nikiforov V. O., Pyrkin A. A.** Methods of adaptive and robust control of nonlinear objects in instrument engineering, Saint Petersburg, NIU ITMO, 2013, 277 p. (in Russian).
8. **Astrom K. J., Wittenmark B.** Adaptive control, Courier Corporation, 2013.
9. **Khalil H. K.** Nonlinear control, New York, Pearson, 2015, pp. 33–45.
10. **Pavlov B. V., Solov'ev I. G.** Systems of direct adaptive control, Moscow, Nauka, 1989, 136 p. (in Russian).
11. **Zhang D., Wei B.** A review on model reference adaptive control of robotic manipulators, *Annual Reviews in Control*, 2017, vol. 43, pp. 188–198.
12. **Parks P.** Liapunov redesign of model reference adaptive control systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1966, vol. 11, no. 3, pp. 362–367.
13. **Aksenov G. S., Fomin V. N.** Synthesis of adaptive controllers based on the Lyapunov function method, *Avtomatika i telemekhanika*, 1982, no. 6, pp. 126–137 (in Russian).
14. **Calise A. J., Shin Y., Johnson M. D.** A Comparison Study of Classical and Neural Network Based Adaptive Control of Wing Rock, *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 2004, pp. 1–17.
15. **Singh S. N., Yirn W., Wells W. R.** Direct adaptive and neural control of wing-rock motion of slender delta wings, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1995, vol. 18, no. 1, pp. 25–30.
16. **Yamamoto Y.** NXTway-GS Model-Based Design-Control of self-balancing two-wheeled robot built with LEGO Mindstorms NXT, *Cybernet Systems Co., Ltd.*, 2008, 65 p.
17. **Glushchenko A. I., Petrov V. A., Lastochkin K. A.** On application of online training for neural network controller of two-wheeled balancing robot, *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*, 2018, no. 3 (73), pp. 27–32 (in Russian).
18. **Glushchenko A. I., Petrov V. A., Lastochkin K. A.** On Development of Neural Network Controller with Online Training to Control Two-Wheeled Balancing Robot, *2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. — *IEEE*, 2018, pp. 1–6.
19. **Zhou K., Doyle J. C., Glover K.** Robust and Optimal Control, Prentice Hall, 1996, 146 p.

Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: (499) 269-5510, (499) 269-5397

Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *Н. В. Яшина*.

Сдано в набор 27.01.2020. Подписано в печать 09.04.2020. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН520. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru