

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 21

2020

№ 7

Издаётся 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

СЕБЯРЯКОВ 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

ШЕРБАТЮК 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 B. 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.

ПУТОВ В. В., д.т.н.

ПШИХОПОВ В. Х., д.т.н.

РАПОПОРТ Э. Я., д.т.н.

СЕРГЕЕВ С. Ф., д.пс.н.

ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д.т.н.

ФРАДКОВ А. Л., д.т.н.

ФУРСОВ В. А., д.т.н.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Директор издательства:

АНТОНОВ Б. И.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Дат Во Куок, Бобцов А. А. Управление по выходу линейными нестационарными системами с использованием методов параметрической идентификации387

Козырев В. Г. Синтез аддитивного терминального управления одноосных движением нелинейных объектов394

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Серебрянный В. В. Коллаборативные мультиагентные системы — альтернатива полной автоматизации производства404

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Myshlyayev Y. I., Finoshin A. V., Nguyen Chi Thanh. Energy-Based Adaptive Oscillation Control of the Electromechanical Systems412

Доценко А. В. Синтез системы разрешения коллизий для группы роботов в парадигме обучения без учителя420

ДИНАМИКА, БАЛЛИСТИКА,
УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Дивеев А. И., Шмалько Е. Ю., Хуссейн О. Управление квадрокоптером методом сетевого оператора на основе многоточечной стабилизации428

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 МНБД Scopus и 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

Vol. 21

2020

No. 7

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:

BEZMEANOVA 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

GARASCHENKO 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.

PUTOV V. V.

PSHIKHOPOV V. Kh.

RAPOPORT E. Ya.

SERGEEV S. F.

ZHUKOV I. A.

Editorial Staff:

BEZMEANOVA M. Yu.

Director of the Publishing House:

ANTONOV B. I.

The mission of the Journal is to cover the current state, trends and perspectives 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

Dat V. Q., Bobtsov A. A. Output Control by Linear Time-Varying Systems using Parametric Identification Methods 387

Kozyrev V. G. Synthesis of the Additive Terminal Control of Uniaxial Motion of Nonlinear Objects 394

AUTOMATION AND CONTROL TECHNOLOGICAL PROCESSES

Serebrenny V. V. Collaborative Multiagent Systems — an Alternative to Full Automation of Production 404

ROBOT, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

Myshlyaev Y. I., Finoshin A. V., Nguyen Chi Thanh. Energy-Based Adaptive Oscillation Control of the Electromechanical Systems 412

Dotsenko A. V. Collision Avoidance System Synthesis for a Group of Robots in Unsupervised Learning Paradigm 420

DYNAMICS, BALLISTICS AND CONTROL OF AIRCRAFT

Diveev A. I., Shmalko E. Yu., Hussein O. Quadcopter Control by the Network Operator Method Based on Multi-Point Stabilization 428

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

Дат Во Куок, аспирант, cuoi.di.em89@gmail.com,
А. А. Бобцов, д-р техн. наук, ведущий профессор, проф., bobtsov@mail.ru,
Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург

Управление по выходу линейными нестационарными системами с использованием методов параметрической идентификации

Рассматривается задача управления линейными нестационарными системами по выходу, т. е. без измерения вектора переменных состояния или производных выходного сигнала. Для синтеза стабилизирующего управления выбирается хорошо зарекомендовавшая себя онлайн процедура решения матричного дифференциального уравнения Риккати. Данная процедура предусматривает синтез линейных статических обратных связей по переменным состояния в случае полностью известных параметров объекта управления. Если переменные состояния не измеряются, то для синтеза наблюдателя с помощью матричного дифференциального уравнения Риккати можно воспользоваться дуальной схемой, предусматривающей транспонирование матрицы состояния и замену матрицы входа на матрицу выхода. Хорошо известно, что наблюдатель переменных состояния построенный на базе решения матричного дифференциального уравнения Риккати, обеспечивает экспоненциальную устойчивость замкнутой системы в случае ее равномерной наблюдаемости. Несмотря на тот факт, что данный тип наблюдателей можно отнести к классу универсальных, они имеют ряд существенных недостатков. Основной проблемой подобных наблюдателей является необходимость точного знания параметров и требование равномерной наблюдаемости, которые на практике не всегда можно реализовать. Таким образом, проблема синтеза новых методов построения наблюдателей переменных состояния линейных нестационарных систем до сих пор остается актуальной. Некоторое время назад был предложен ряд методов синтеза адаптивных наблюдателей переменных состояния для нелинейных систем. Основная идея синтеза наблюдателей базировалась на преобразовании исходной динамической системы к линейной регрессионной модели, содержащей неизвестные параметры, которые, в свою очередь, являлись функциями от начальных условий переменных состояния объекта управления. Такой подход в англоязычной литературе получил название РЕВО (parameter estimation based observer), что дословно можно перевести как "наблюдатель, основанный на оценивании параметров". В данной статье на базе метода РЕВО предлагается новый подход к синтезу наблюдателей переменных состояния для нестационарных систем. Данный подход обеспечивает возможность получения монотонных оценок сходимости с регулированием времени переходного процесса.

Ключевые слова: нестационарные системы, наблюдатели переменных состояния, идентификация параметров

Введение

Проблема управления линейными стационарными системами является классической и хорошо изученной проблемой современной теории управления. За последние несколько десятилетий для специальных математических структур объектов управления были предложены разные оригинальные методы (см., например, работы [1–10]). Так, в классе адаптивных и робастных методов управления по выходу широко представлены регуляторы с сильной обратной связью (см., например, статьи [1, 2]) допускающие, что линейная стационарная система представлена в некоторой специальной форме вида

$$\dot{x}(t) = Fx(t) + \eta(t)y(t) + bu(t), y(t) = h^T x(t),$$

где вектор $x(t)$ не измеряется; F , b и h — неизвестные постоянные матрицы; $\eta(t)$ — вектор неизвестных переменных параметров; $y(t)$ — выходная переменная системы, которая под-
лежит измерениям.

В статьях [1, 2] в предположении, что передаточная функция для тройки матриц F , b и h является минимально-фазовой, был синтезирован регулятор, обеспечивающий для достаточно больших коэффициентов обратной связи стабилизацию линейного нестационарного объекта. Аналогично статьям [1, 2] в работах [3–10] представлены регуляторы, позволяющие стабилизировать линейные нестационарные системы, на которые наложены некоторые структурные ограничения. Однако насколько известно авторам данной статьи, не существует общих

методов, кроме классического подхода — решения в реальном масштабе времени матричного дифференциального уравнения Риккати. Иными словами, в данной статье рассматривается задача стабилизации полностью управляемого и наблюдаемого линейного нестационарного объекта управления, представленного в форме вход—состояние—выход:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t), \quad (1)$$

$$y(t) = C(t)x(t), \quad (2)$$

где $x(t) \in R^n$ — неизмеряемый вектор переменных состояния; $A(t)$, $B(t)$ и $C(t)$ — нестационарные матрицы с известными коэффициентами; $u(t)$ — сигнал управления.

Математическая постановка задачи

Рассмотрим полностью управляемый и наблюдаемый нестационарный одноканальный объект управления (1), (2). Предполагая, что все параметры модели (1), (2) являются известными (т. е. коэффициенты матриц $A(t)$, $B(t)$ и $C(t)$ — известные функции времени), но вектор переменных состояния $x(t)$ не измеряется, требуется синтезировать закон управления $u(t)$, обеспечивающий асимптотическую устойчивость положения равновесия $x = 0$.

Синтез закона управления

В данном разделе рассмотрим решение задачи синтеза закона управления при допущениях, рассмотренных в разделе "Математическая постановка задачи". Решение задачи синтеза закона управления будет проведена в два этапа. На первом этапе будем допускать, что вектор переменных состояния $x(t)$ измеряется. Для решения данной задачи будем использовать онлайн процедуру решения матричного дифференциального уравнения Риккати (см., например, работы [11, 12]). На втором этапе рассмотрим новый метод синтеза наблюдателя переменных состояния $x(t)$ и далее, на базе полученных оценок, еще раз воспользуемся процедурой решения уравнения Риккати.

Этап 1. Рассмотрим модель (1), (2) в предположении, что вектор переменных состояния $x(t)$ измеряется. Выберем закон управления в следующем виде:

$$u(t) = -B^T P x(t), \quad (3)$$

где нестационарная матрица P находится из решения дифференциального уравнения Риккати

$$\dot{P} + A^T P + P A - P B B^T P = -2\alpha P - Q, \quad (4)$$

где число $\alpha > 0$ и стационарная матрица $Q = Q^T > 0$.

Покажем, что при использовании закона управления (3) для объекта (1), (2) можно получить экспоненциальную сходимость вектора переменных состояния $x(t)$ к нулю. Для этого рассмотрим функцию Ляпунова вида

$$V = x^T P x. \quad (5)$$

Дифференцируя (5) с учетом уравнений (1)–(4), имеем

$$\dot{V} = -2\alpha x^T P x - x^T Q x \leq -2\alpha V. \quad (6)$$

Из неравенства (6) следует экспоненциальная сходимость вектора $x(t)$ к нулю.

Для иллюстрации работоспособности закона управления (3), (4) представим результаты компьютерного моделирования. Пусть параметры матриц $A(t)$, $B(t)$ имеют следующий вид:

$$A(t) = \begin{bmatrix} a_1(t) & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad B(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$a_1(t) = \begin{cases} -0,2t & \text{при } t < 5; \\ -1 & \text{при } t \geq 5. \end{cases}$$

Проведем компьютерное моделирование для единичной матрицы $Q = Q^T > 0$ и различных значений коэффициента $\alpha > 0$. График переходного процесса при $u(t) = 0$ представлен на рис. 1. На рис. 2, 3 и 4, 5 представлены, соответственно, графики переходных процессов для $\alpha = 1$ и $\alpha = 10$.

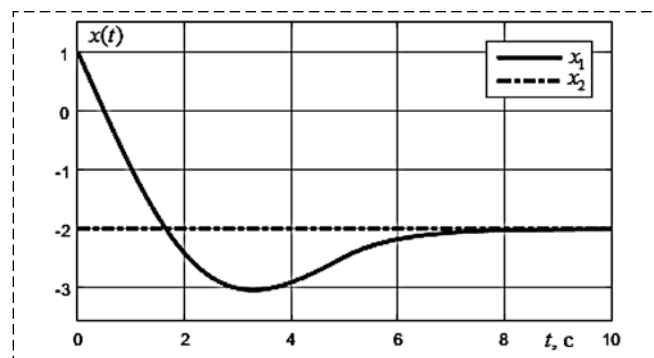


Рис. 1. Переходные процессы для вектора переменных состояния $x(t)$ при $u(t) = 0$

Fig. 1. Transients for the vector of state variables $x(t)$ for $u(t) = 0$

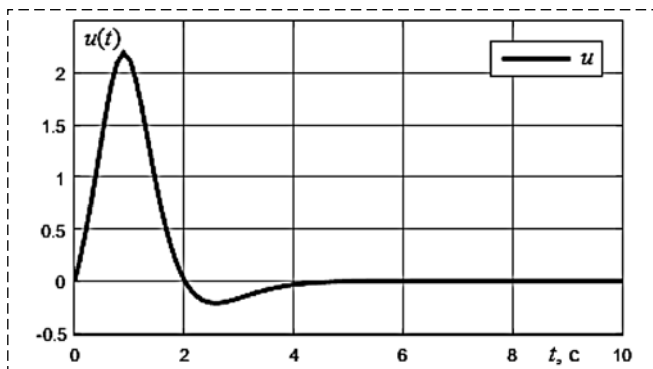


Рис. 2. График переходного процесса для функции $u(t)$ при $\alpha = 1$
Fig. 2. Graph of transient for function $u(t)$ for $\alpha = 1$

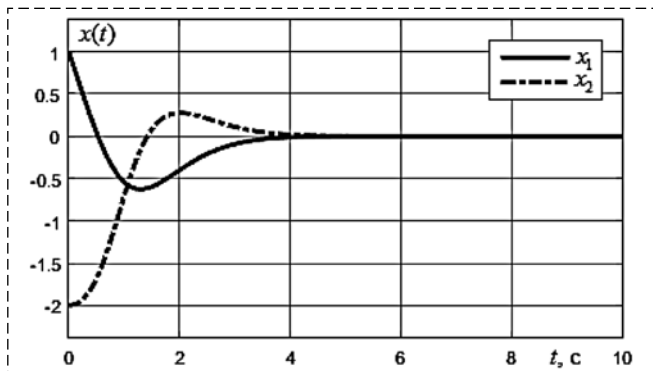


Рис. 3. Переходные процессы для вектора переменных состояния $x(t)$ при $\alpha = 1$
Fig. 3. Transients for the vector of state variables $x(t)$ for $\alpha = 1$

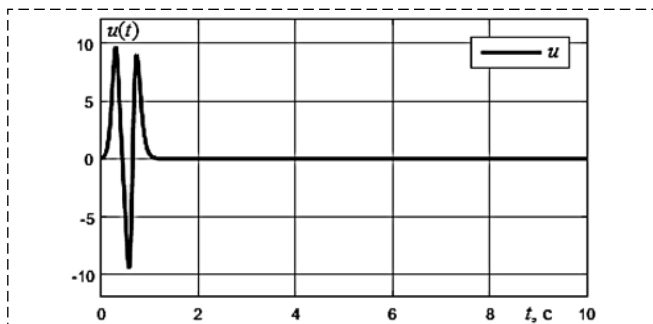


Рис. 4. График переходного процесса для функции $u(t)$ при $\alpha = 10$
Fig. 4. Graph of transient for function $u(t)$ for $\alpha = 10$

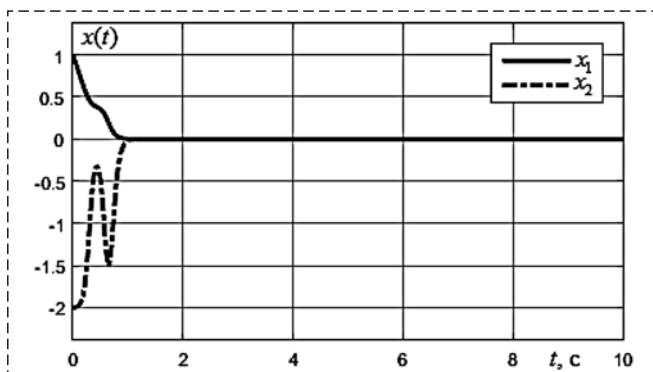


Рис. 5. Переходные процессы для вектора переменных состояния $x(t)$ при $\alpha = 10$
Fig. 5. Transients for the vector of state variables $x(t)$ for $\alpha = 10$

Из графиков переходных процессов можно видеть, что увеличение значений коэффициента α позволяет ускорить процессы сходимости переменных состояния системы (1)–(3) к нулю.

Этап 2. На данном этапе рассмотрим новый метод синтеза наблюдателя для объекта управления (1), (2). Для синтеза наблюдателя будем использовать идеи, предусматривающие использование методов параметрической идентификации, опубликованные в работах [13, 14]. Для этого рассмотрим динамическую систему, полностью эквивалентную (1), т. е.

$$\dot{z}(t) = A(t)z(t) + B(t)u(t). \quad (7)$$

Рассмотрим вектор

$$e(t) = z(t) - x(t). \quad (8)$$

Дифференцируя соотношение (8), получаем

$$\dot{e}(t) = A(t)e(t). \quad (9)$$

Сформируем фундаментальную матрицу решения уравнения (9)

$$\Phi(t) = A(t)\Phi(t),$$

где для простоты выберем $\Phi(0) = 1$.

Хорошо известно (см., например, работу [15]), что

$$e(t) = \Phi(t)\theta,$$

где $\theta = z(0) - x(0)$.

Тогда из уравнения (8) следует

$$x(t) = z(t) - e(t) = z(t) - \Phi(t)\theta,$$

откуда легко видеть, что задача оценивания вектора $x(t)$ может быть сведена к идентификации вектора неизвестных параметров θ , т. е.

$$\hat{x}(t) = z(t) - \Phi(t)\hat{\theta}. \quad (10)$$

Для идентификации вектора неизвестных параметров θ воспользуемся уравнением (2):

$$y(t) = C(t)z(t) - C(t)\Phi(t)\theta. \quad (11)$$

Из уравнения (11) получаем классическую регрессионную модель вида

$$q = \omega^T \theta, \quad (12)$$

где скаляр $q = y(t) - C(t)z(t)$ и вектор $\omega^T = C(t)\Phi(t)$.

Для идентификации вектора неизвестных параметров θ можно воспользоваться стан-

дартными процедурами, например, градиентным алгоритмом:

$$\frac{d\hat{\theta}}{dt} = -k\omega\omega^T\hat{\theta} + k\omega q, \quad (13)$$

где $k > 0$ — коэффициент настройки.

Однако хорошо известно, что в случае градиентного алгоритма (13) вектор $\hat{\theta}$ сходится к θ при условии незатухающего возбуждения (см. подробнее работы [16–18]). Более того, алгоритм (13) не дает возможности существенного ускорения процессов идентификации за счет выбора коэффициента настройки $k > 0$. Для обеспечения высокого быстродействия оценивания параметров, а также монотонности их переходных процессов воспользуемся методом DREM (см., например, статью [16]). Следуя работе [16], пропустим известные элементы регрессионной модели (12) через блоки запаздывания $[H(\cdot)](t) = (\cdot)(t - \tau)$, где $\tau \in R_+$. Тогда для модели (12) имеем

$$q_{f_i} = \omega_{f_i}^T \theta. \quad (14)$$

Сформулируем на основе исходной регрессионной модели (12) и новой отфильтрованной регрессионной модели (14) расширенную регрессионную модель

$$q_e = A_e \theta, \quad (15)$$

$$\text{где } q_e = \begin{bmatrix} q \\ q_{f_1} \\ \vdots \\ q_{f_{n-1}} \end{bmatrix}, A_e = \begin{bmatrix} \omega^T \\ \omega_{f_1}^T \\ \vdots \\ \omega_{f_{n-1}}^T \end{bmatrix}, \theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix}.$$

Умножая уравнение (15) на алгебраическое дополнение A_e , получаем

$$Y = \text{adj} A_e q_e = \Delta \theta,$$

откуда получаем скалярную модель вида

$$Y_i = \Delta \theta_i,$$

где $\Delta = \det\{A_e\}$ — определитель матрицы A_e .

Оценку θ_i будем осуществлять по формуле, аналогичной (13), с тем лишь отличием, что рассмотрению подлежит скалярное уравнение

$$d\hat{\theta}_i/dt = -k_i\Delta(\Delta\hat{\theta}_i - Y_i), \quad (16)$$

где k_i — положительное число, увеличивая которое, можно добиваться ускорения процессов

сходимости неизвестных параметров к истинным значениям.

Легко показать, что для ошибки оценивания параметра $\tilde{\theta}_i = \hat{\theta}_i - \theta_i$ справедливо

$$\dot{\tilde{\theta}}_i = -k_i\Delta^2\tilde{\theta}_i, \quad (17)$$

откуда легко показать, что за счет увеличения числа k_i можно добиваться увеличения скорости сходимости $\tilde{\theta}_i$.

С учетом наблюдателя (7), (10), (16) запишем закон управления (3) следующим образом:

$$u(t) = -B^T P \hat{x}(t). \quad (18)$$

Возникает резонный вопрос относительно преимуществ используемого метода синтеза наблюдателя по отношению к достаточно очевидному подходу, предусматривающему решение матричного дифференциального уравнения Риккати (см, например, [11, 12]). Суть этого подхода заключается в синтезе наблюдателя вида

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu - HC^T(C\hat{x} - y),$$

где матрица H является решением матричного уравнения

$$\dot{H} = HA^T + AH - HC^TCH + Q.$$

Хорошо известно (см., например, работы [11, 12]), что данный наблюдатель обеспечивает экспоненциальную сходимость, если система является равномерно наблюдаемой, т. е. существуют положительные числа T_0 , δ_1 и δ_2 такие, что для любого момента времени t выполняется неравенство

$$\delta_1 I \leq \int_t^{t+T_0} \Phi^T(t, \tau) C^T C \Phi(t, \tau) d\tau \leq \delta_2 I,$$

где $\Phi(\cdot, \cdot)$ — переходная матрица системы (1).

Однако реализация подобных наблюдателей имеет ряд недостатков. Прежде всего это вычисление матрицы H , требующее решения онлайн n дифференциальных уравнений с квадратичными членами, которые могут быть чувствительны к численным методам. Еще одним существенным недостатком является точное знание всех параметров объекта управления (1). В частности, при $C = rC_0$, где r — неизвестное число, а C_0 — известная матрица, предлагаемый подход не работает, но метод (7), (10), (16) может быть успешно применен с небольшим усложнением в настройке параметров. В самом деле, если принять $C = rC_0$,

где r — неизвестное число, а C_0 — известная матрица, то из уравнения (11) получим

$$y(t) = rC_0z(t) - rC_0\Phi(t)\theta,$$

откуда по описанной ранее процедуре можно найти параметры r и θ .

Для иллюстрации работоспособности предлагаемого подхода к синтезу наблюдателя проведем компьютерное моделирование. Примем, как и в предыдущем примере, следующие параметры объекта управления:

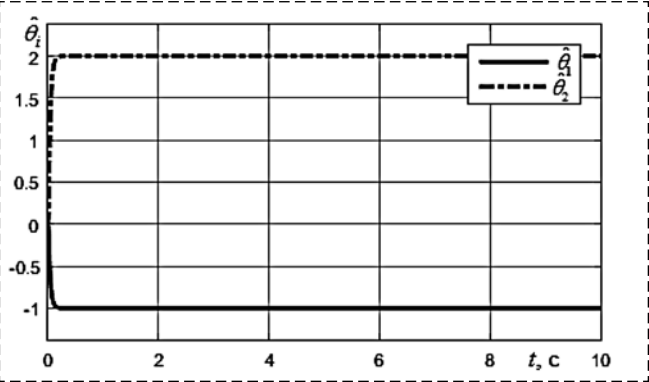


Рис. 6. Графики оценок параметров $\hat{\theta}_i$ ($\tau = 0,01$, $Q = I$, $\alpha = 1$)
 Fig. 6. Graphs of parameter estimations $\hat{\theta}_i$ ($\tau = 0,01$, $Q = I$, $\alpha = 1$)

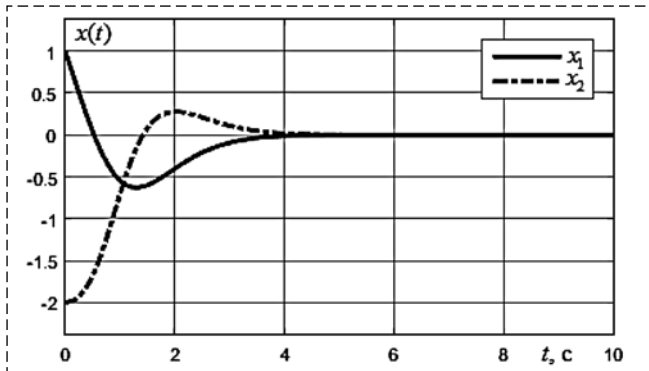


Рис. 7. Графики сигналов x ($Q = I$, $\alpha = 1$)
 Fig. 7. Graphs of signals x ($Q = I$, $\alpha = 1$)

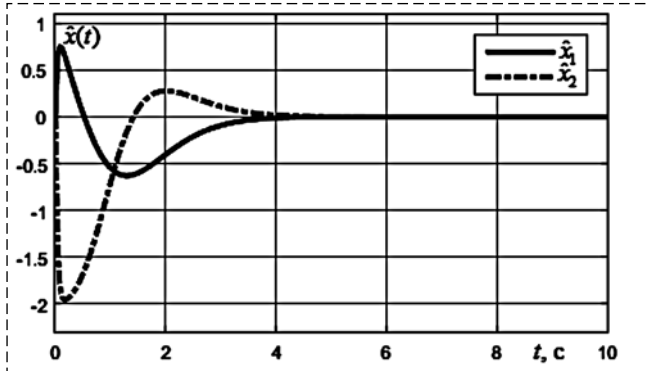


Рис. 8. Графики оценок сигналов $\hat{x}$ ($\tau = 0,01$, $Q = I$, $\alpha = 1$)
 Fig. 8. Graphs of estimations $\hat{x}$ ($\tau = 0,01$, $Q = I$, $\alpha = 1$)

$$A(t) = \begin{bmatrix} a_1(t) & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad B(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$a_1(t) = \begin{cases} -0,2t & \text{при } t < 5; \\ -1 & \text{при } t \geq 5. \end{cases}$$

Зададим $\tau = 0,01$, $k_i = 500$ и $z(0) = 0$ и про- моделируем наблюдатель (7), (10), (16) совме- стно с законом управления (18). Выберем, как и ранее, единичную матрицу $Q = Q^T > 0$ и про- моделируем замкнутую систему для различных значений коэффициента $\alpha > 0$. На рис. 6—8

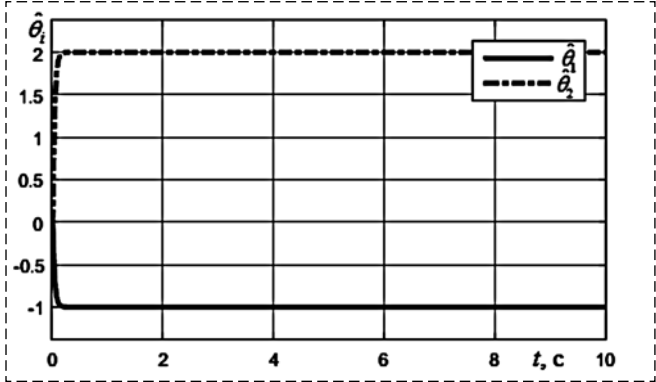


Рис. 9. Графики оценок параметров $\hat{\theta}_i$ ($\tau = 0,01$, $Q = I$, $\alpha = 10$)
 Fig. 9. Graphs of parameter estimations $\hat{\theta}_i$ ($\tau = 0,01$, $Q = I$, $\alpha = 10$)

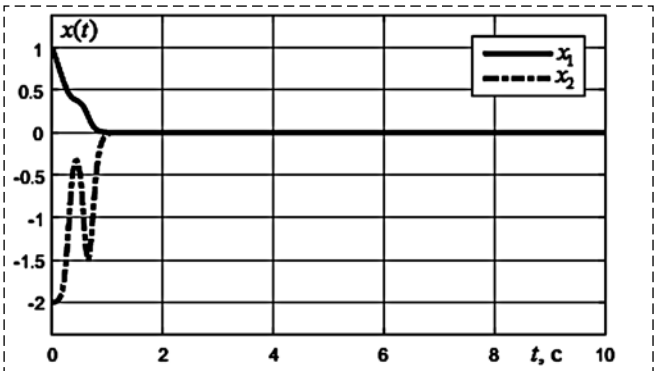


Рис. 10. Графики сигналов x ($Q = I$, $\alpha = 10$)
 Fig. 10. Graphs of signals x ($Q = I$, $\alpha = 10$)

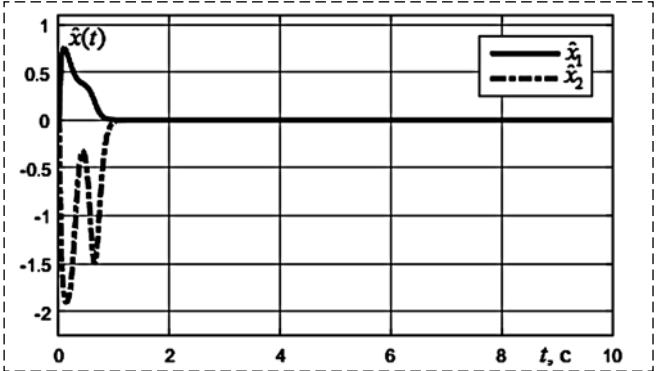


Рис. 11. Графики оценок сигналов $\hat{x}$ ($\tau = 0,01$, $Q = I$, $\alpha = 10$)
 Fig. 11. Graphs of estimations $\hat{x}$ ($\tau = 0,01$, $Q = I$, $\alpha = 10$)

и 9—11 представлены, соответственно, графики переходных процессов для коэффициентов $\alpha = 1$ и $\alpha = 10$.

Заключение

В статье был рассмотрен новый метод синтеза закона управления по выходу для системы (1), (2). Был синтезирован наблюдатель переменных состояния вида (7), (10), (16), обеспечивающий асимптотическую сходимость настраиваемых оценок к истинным значениям объекта управления. Для синтеза наблюдателя был использован новый подход, предусматривающий преобразование исходной модели объекта управления к линейной регрессионной модели вида (12). Представленные в статье результаты компьютерного моделирования иллюстрируют работоспособность предложенного подхода, а также демонстрируют хорошее качество переходных процессов.

В качестве перспектив развития рассмотренного подхода, видится его расширение на класс систем с неизвестными параметрами, а также в условиях возмущающих воздействий.

Список литературы

1. Бобцов А. А., Наговицина А. Г. Адаптивное управление по выходу линейными нестационарными объектами // Автоматика и телемеханика. 2006. № 12. С. 163—174.
2. Бобцов А. А., Григорьев В. В., Наговицина А. Г. Алгоритм адаптивного управления нестационарным объектом в условиях возмущения и запаздывания // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 1. С. 8—14.

3. Цыкунов А. М. Робастное управление нестационарными объектами // АиТ. 1996. № 2. С. 117—125.
4. Бобцов А. А., Лямин А. В., Сергеев К. А. Синтез закона адаптивного управления для стабилизации не точно заданных нестационарных объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2001. № 3. С. 3—7.
5. Никифоров В. О. Робастная следящая система // Изв. вузов. Приборостроение. 1998. № 7. С. 13—18.
6. Барабанов Н. Е. О стабилизации линейных нестационарных систем с неопределенностью в коэффициентах // АиТ. 1990. № 10.
7. Tsakalis K. S., Ioannou P. A. Adaptive control of linear time-varying plants // Automatica. 1987. Vol. 23, № 4. P. 459—468.
8. Tsakalis K. S., Ioannou P. A. Linear time varying systems: control and adaptation. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1993.
9. Zhang Y., Fidan B., Ioannou P. A. Backstepping control of linear time-varying systems with known and unknown parameters // IEEE Trans. Automat. Contr. 2003. Vol. 48, № 11. P. 1908—1925.
10. Юркевич В. Д. Синтез нелинейных нестационарных систем управления с разнотемповыми процессами. СПб: Наука, 2000.
11. Wilson J. Rugh. Linear system theory. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1996.
12. Juan Rueda-Escobedo, Rosane Ushirobira, Denis Efimov, Jaime Moreno. Gramian-based uniform convergent observer for stable ltv systems with delayed measurements // International Journal of Control, 2019.
13. Romeo Ortega, Alexey Bobtsov, Anton Pyrkin, Stanislav Aranovskiy. A parameter estimation approach to state observation of nonlinear systems // Systems & Control Letters. November 2015. Vol. 85. P. 84—94.
14. Romeo Ortega, Alexey Bobtsov, Denis Dochain, Nikolay Nikolaev. State observers for reaction systems with improved convergence rates // Journal of Process Control. November 2019. Vol. 83. P. 53—62.
15. Демидович Б. П. Лекции по математической теории устойчивости. М.: Наука, 1967. 472 с.
16. Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A. Performance Enhancement of Parameter Estimators via Dynamic Regressor Extension and Mixing // IEEE Trans. Automat. Control. 2016. Vol. 62, N. 7. P. 3546—3550.
17. Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000.
18. Sastry S., Bodson M. Adaptive Control: Stability, Convergence and Robustness. Courier Dover Publications, 2011. 400 p.

Output Control by Linear Time-Varying Systems using Parametric Identification Methods

V. Q. Dat, cuoi.di.em89@gmail.com, A. A. Bobtsov, bobtsov@mail.ru,
ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: Bobtsov Alexey A., Dr. Sci. Tech., Professor,
ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russian Federation,
e-mail: bobtsov@mail.ru

Accepted on April 15, 2020

Abstract

In this paper the problem of control for time-varying linear systems by the output (i.e. without measuring the vector of state variables or derivatives of the output signal) was considered. For the control design, the well-known online procedure for solving the Riccati matrix differential equation is chosen. This procedure involves the synthesis of linear static feedbacks on state variables in the case of known parameters of the plant. If state variables are not measured, then for the observer design using the matrix Riccati differential equation, using the dual scheme, which provides for the transposition of the state

matrix and the replacement of the input matrix by the output matrix. It is well known that an observer of state variables built on the basis of a solution of the Riccati matrix differential equation ensures the exponential stability of a closed loop system in the case of uniform observability. Despite the fact that this type of observer can be classified as universal, its have a number of significant drawbacks. The main problem of such observers is the need for accurate knowledge of the parameters and the requirement for uniform observability, which in practice cannot always be realized. Thus, the problem of the new methods design for constructing observers of state variables of linear non-stationary systems is still relevant. Some time ago, a number of methods for the adaptive observers design of state variables for nonlinear systems were proposed. The main idea of the synthesis of observers was based on the transformation of the original dynamic system to a linear regression model containing unknown parameters, which in turn were functions of the initial conditions of the state variables of the control object. This approach in the English language literature is called PEBO. This paper, based on the PEBO method, proposes a new approach for the observers design of state for non-stationary systems. This approach provides the possibility of obtaining monotonic convergence estimates with transient time tuning.

Keywords: linear time-varying systems, state observers, parameters identification

For citation:

Dat V. Q., Bobtsov A. A. Output Control by Linear Time-Varying Systems using Parametric Identification Methods, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 7, pp. 387–393.

DOI: 10.17587/mau.21.387-393

References

1. Bobtsov A. A., Nagovitsina A. G. Adaptive control of linear nonstationary objects output, *Avtomatika i Telemekhanika*, 2006, no. 12, pp. 163–174 (in Russian).
2. Bobtsov A. A., Grigoryev V. V., Nagovitsina A. G. Adaptive control algorithm by nonstationary object in terms of disturbance and delay time, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye*, 2007, no. 1, pp. 8–14 (in Russian).
3. Cykunov A. M. Robust control of nonstationary objects, *Avtomatika i Telemekhanika*, 1996, no. 2, pp. 117–125 (in Russian).
4. Bobtsov A. A., Ljain A. V., Sergeev K. A. Synthesis of the law of adaptive control for stabilization of not exactly specified non-stationary objects, *Izv. vuzov. Priborostroenie*, 2001, no. 3, pp. 3–7 (in Russian).
5. Nikiforov V. O. Robust tracking system, *Izv. vuzov. Priborostroenie*, 1998, no. 7, pp. 13–18 (in Russian).
6. Barabanov N. E. On stabilization of linear nonstationary systems with uncertainty in coefficients, *Avtomatika i Telemekhanika*, 1990, no. 10 (in Russian).
7. Tsakalis K. S., Ioannou P. A. Adaptive control of linear time-varying plants, *Automatica*, 1987, vol. 23, no. 4, pp. 459–468.
8. Tsakalis K. S., Ioannou P. A. Linear time varying systems: control and adaptation, Upper Saddle River, NJ, Prentice-Hall, 1993.

9. Zhang Y., Fidan B., Ioannou P. A. Backstepping control of linear time-varying systems with known and unknown parameters, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 2003, vol. 48, no. 11, pp. 1908–1925.
10. Jurkevich V. D. Synthesis of nonlinear nonstationary control systems with multi-tempo processes, *SPb, Nauka*, 2000 (in Russian).
11. Wilson J. Rugh. Linear system theory, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1996.
12. Juan Rueda-Escobedo, Rosane Ushirobira, Denis Efimov, Jaime Moreno. Gramian-based uniform convergent observer for stable ltv systems with delayed measurements, *International Journal of Control*, 2019.
13. Romeo Ortega, Alexey Bobtsov, Anton Pyrkin, Stanislav Aranovskiy. A parameter estimation approach to state observation of nonlinear systems, *Systems & Control Letters*, November 2015, vol. 85, pp. 84–94.
14. Romeo Ortega, Alexey Bobtsov, Denis Dochain, Nikolay Nikolaev. State observers for reaction systems with improved convergence rates, *Journal of Process Control*, November 2019, vol. 83, Pages 53–62.
15. Demidovich B. P. Lectures on the mathematical theory of stability, Moscow, Nauka, 1967, 472 c. (in Russian).
16. Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A. Performance Enhancement of Parameter Estimators via Dynamic Regressor Extension and Mixing, *IEEE Trans. Automat. Control*, 2016, vol. 62, no. 7, pp. 3546–3550.
17. Miroshnik I. V., Nikiforov V. O., Phradkov V. O. Non-linear and adaptive control of complex dynamic systems, SPb: Nauka, 2000 (in Russian).
18. Sastry S., Bodson M. Adaptive Control: Stability, Convergence and Robustness, Courier Dover Publications, 2011, 400 p.



11 декабря 2020 г. в г. Новокузнецк
на базе Научно-исследовательского центра "МашиноСтроение" (НИЦ МС) состоится

IV Международная научно-практическая конференция "МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИКА И РОБОТОТЕХНИКА"

Секции конференции

- Роботы, мехатроника и робототехнические системы
- Методы и техника создания и исследования интеллектуальных машин
- Механика и управление движением машин
- Механизация, автоматизация и управление технологическими процессами и производствами
- Методы контроля и диагностики в машиностроении
- Информационно-измерительные и управляющие системы
- Математическое и программное обеспечение вычислительных машин и комплексов

По итогам конференции издается сборник трудов с присвоением УДК, ББК, ISSN. Сборник индексируется в базе данных РИНЦ. Всем публикациям постатейно присваивается цифровой идентификатор DOI.

Подробную информацию о конференции см. на сайте:
<http://srcms.ru>

В. Г. Козырев, канд. техн. наук, доц., vldr.kzrv@yandex.ru,
Севастопольский государственный университет

Синтез аддитивного терминального управления одноосным движением нелинейных объектов

Предлагается метод синтеза законов терминального управления одноосным перемещением нелинейных динамических объектов. Задача решается для случая, когда управляющее воздействие входит скалярной аддитивной составляющей в нелинейные уравнения объекта. Целевые законы управления отвечают требованию перевода объекта из произвольного начального состояния в заданное конечное положение с заданной конечной скоростью. Остальные параметры состояния объекта в конечный момент времени в общем случае не контролируются. При назначении нулевой конечной скорости достигается "мягкий" переход объекта в заданное положение, необходимый для многих терминальных систем.

Ввиду принципиальной сложности оптимального синтеза в условиях, когда объект управления обладает нелинейными свойствами, предпочтительной представляется чисто терминальная постановка задачи. Одним из эффективных средств ее решения являются методы планирования траекторий и решения обратных задач динамики. Этот подход принят в данном исследовании. Привлечение его совместно с дополнительным анализом позволило записать закон управления в форме обратной связи для случая нелинейной математической модели объекта.

Разработанный метод синтеза отличается простотой формы и удобством технической реализации, например с помощью встраиваемых микроконтроллеров. Известные общие методы связаны с неоправданным для рассматриваемого случая расходом временных и технических ресурсов системы управления. Указанная экономичность данного метода достигается благодаря учету особенностей скалярного и аддитивного характера управления в системе.

Использование метода проиллюстрировано примером "мягкого" поворота вала электродвигателя последовательного возбуждения на заданный угол с нулевой конечной скоростью, что не требует применения жестких упоров. Последнее обстоятельство существенно улучшает качество терминального управления. При данном условии значительно упрощается организация позиционирования подвижных исполнительных органов разнообразного промышленного оборудования.

Ключевые слова: терминальное управление, обратная задача динамики, планирование траекторий, "мягкий" поворот вала электродвигателя

Введение

Терминальное управление составляет неотъемлемую часть современных технологий. Мягкое приземление космической станции на поверхность планеты, посадка самолета вертикального взлета и вертолета на площадку ограниченных размеров, перевод антенны из одного углового положения в другое, поворот судового руля на требуемый угол, замыкание контактов электрического аппарата с допустимой скоростью соударения — все это примеры терминального управления. Данные задачи объединяет одна общая цель — перевести объект управления — самолет, исполнительный орган и т.п. — из одного положения или состояния в другое за конечное время. Реализующее эту цель управление и принято называть *терминальным*.

Проблемам терминального управления посвящено значительное число научных работ [1–17]. Они выполнены как в оптимальной [1–8], так и в чисто терминальной [9–17] постановке с поиском законов управления разомкнутого и замкнутого типов для линейных и нелиней-

ных уравнений объектов. Применение методов оптимизации [1–4] для синтеза терминального управления в случае, когда объект управления обладает нелинейными свойствами, крайне затруднительно. Такую задачу удастся решить лишь для сравнительно узкого класса управляемых объектов — преимущественно линейных стационарных [3, 5, 7, 14] или линеаризуемых на каждом такте работы бортового компьютера [8], что, правда, приводит к значительным вычислительным затратам.

Если объект нелинейный, традиционно прибегают к компромиссному варианту конструирования управления, исходящему из принципа "невозмущенно-возмущенного движения" [1, 3, 8]. Он заключается в декомпозиции задачи управления на две подзадачи: планирование управляемого невозмущенного движения и стабилизация запланированного движения в условиях действия возмущений. Первая задача решается для отправных, нелинейных, уравнений объекта, из которых определяется программное управление. Вторая — для линеаризованных уравнений, полученных из отправных при ус-

ловии малых отклонений состояния объекта от программного движения, что позволяет осуществить синтез стабилизирующего управления. Однако при значительных отклонениях состояния от планируемого этот способ становится неправомерным. К тому же он сопряжен с громоздкой технической реализацией закона управления, неприемлемой для рассматриваемой в данной статье задачи.

Альтернативой модели невозмущенно-возмущенного движения являются принципы, изложенные в аналитических работах [4, 18, 19]. Они сводятся к осуществлению гибких стратегий терминального управления, обеспечивающих требуемую точность управления в конечный момент времени. Этот подход может проводиться как без априорного формирования программных траекторий [4], так и посредством их планирования с временной или с пространственной синхронизацией [18, 19]. Первый вариант [4] предусматривает предсказание конечного состояния в процессе функционирования системы на основе интегрирования уравнений движения ЛА в ускоренном масштабе времени и формирование управления как функции текущей предсказываемой ошибки терминального управления. При этом используется кусочно-линейная аппроксимация нелинейных характеристик уравнений движения. Этот вариант связан с большими затратами временных и технических ресурсов. Второй вариант [18, 19] реализует концепцию "гибких кинематических траекторий" и является достаточно эффективным для широкого круга практических задач.

В основе подхода [18, 19] лежит метод планирования траекторий и концепция обратных задач динамики. Отмечено [18, 19], что кинематический аспект играет существенную роль в задачах управления движением, а специфика задач управления подвижными объектами обусловлена двумя обстоятельствами: во-первых, преимущественно нелинейной структурой их уравнений динамики и, во-вторых, целевыми требованиями к кинематике управляемых движений.

Ряд терминальных задач представляют случаи, когда движение объекта происходит по фиксированной оси. Перечисленные ранее примеры относятся именно к таким типам движения. Их рассмотрению и посвящена настоящая статья. В ней развиваются идеи, согласующиеся с методологией работ [18, 19] и отталкивающиеся от методов обратных задач динамики и планирования траекторий. В данной статье они

распространены на класс нелинейных аддитивно управляемых объектов, движущихся по фиксированной оси. Дальнейший анализ позволил осуществить синтез терминального управления в форме обратной связи. В частности, одной из возможностей построенного управления является "мягкое" приведение объекта в конечное состояние, т.е. такое, при котором скорость в конечный момент времени становится равной нулю. Полученное решение, в отличие от метода, приведенного в работах [20—22], не требует предварительной линеаризации исходных уравнений или, как в работе [17], наличия у математической модели системы особых свойств симметрии.

Постановка задачи

Рассмотрим управляемый динамический объект, движущийся вдоль некоторой оси согласно системе дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned}\frac{ds}{dt} &= v; \\ \frac{dv}{dt} &= F/m; \\ \frac{dx_k}{dt} &= f_k + b_k u, \quad k = 1, 2, \dots, n.\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь s — координата объекта вдоль оси движения Ox ; v — скорость объекта; x_k — другие переменные, характеризующие состояние объекта; m — масса объекта; u — управляющее воздействие; $F = F(t, s, v, x_1, \dots, x_n)$ — механическая сила, действующая на объект вдоль оси Ox и зависящая от времени и переменных состояния (предполагается, что функция F дифференцируема по своим аргументам); $f_k = f_k(t, s, v, x_1, \dots, x_n)$ и $b_k = b_k(t, s, v, x_1, \dots, x_n)$ — некоторые функции времени и переменных состояния.

Поставим следующую задачу управления объектом (1): при известном начальном состоянии его в момент времени $t = t_0$

$$\begin{aligned}s(t_0) &= s_0, \quad v(t_0) = v_0, \\ x_k(t_0) &= x_{k0}\end{aligned}\quad (2)$$

необходимо найти закон изменения управляющего воздействия $u = u(t)$, переводящий объект в заданное конечное положение s_f с заданной конечной скоростью v_f к моменту времени $t = t_f = t_0 + T$, где T — длительность времени перевода:

$$s(t_f) = s_f, \quad v(t_f) = v_f. \quad (3)$$

Планирование траектории. Решение задачи будем проводить в терминальной постановке на основе использования методов планирования траекторий и обратных задач динамики. Ввиду нелинейного характера рассматриваемого объекта управления и связанной с этим существенной сложности оптимизации управления подобный подход представляется целесообразным.

В соответствии с поставленной задачей необходимо построить траекторию движения объекта в виде дважды непрерывно дифференцируемой функции времени $s = s(t)$, проходящей через две опорных точки маршрута $s(t_0) = s_0$, $s(t_f) = s_f$ с заданными значениями скорости $v = v(t)$ в этих точках: $v(t_0) = v_0$, $v(t_f) = v_f$. Мы употребляем здесь термин "траектория" в обобщенном смысле, по аналогии с параметрическим описанием траектории в n -мерном пространстве (см., например, работы [23, 24]). Буквально же траектория в нашей задаче, как линия в пространстве, — это просто отрезок $[s_0, s_f]$ оси O_s (необязательно прямолинейной).

Сделанная постановка относит нас к классу задач терминального управления, являющихся, по сути, краевыми задачами. Для их решения широко применяется упомянутый выше метод обратных задач динамики. Осуществляется задание (планирование) желаемой траектории движения объекта и ищется управляющее воздействие, вызывающее движение по этой траектории [9, 10, 13, 23].

При планировании траектории $s = s(t)$ воспользуемся известным рациональным способом, применяемым во многих работах [9, 10, 13, 15, 16, 23, 24]. Он состоит в идее нахождения функции $s = s(t)$ путем сужения множества допустимых решений до некоторого набора многопараметрических функций времени

$$s = s(c_1, c_2, \dots, c_p, t), \quad (4)$$

где $c_1, c_2, \dots, c_p$ — неизвестные пока параметры.

Дифференцируя зависимость (4), запишем также скорость и ускорение объекта при рассматриваемом движении:

$$v = \frac{ds}{dt} = v(c_1, c_2, \dots, c_p, t);$$

$$a = \frac{d^2s}{dt^2} = a(c_1, c_2, \dots, c_p, t).$$

Функция $s(t)$ и ее производные должны удовлетворять граничным условиям согласно соотношениям (2), (3):

$$\begin{aligned} s(t_0) &= s_0, v(t_0) = v_0, \\ s(t_f) &= s_f, v(t_f) = v_f. \end{aligned} \quad (5)$$

Кроме того, второе уравнение системы (1) предполагает выполнение еще одного условия

$$a(t_0) = F(t_0)/m. \quad (6)$$

Из этих условий можно найти неизвестные коэффициенты $c_1, c_2, \dots, c_p$. Для удовлетворения всех пяти условий достаточно пяти коэффициентов, например $c_1, c_2, \dots, c_5$. Остальные $c_6, c_7, \dots, c_p$ можно отбросить или оставить свободными в целях достижения дополнительных характеристик качества управляемого процесса.

Дальнейшую процедуру принято сводить к заданию функции (4) в виде линейной комбинации базисных функций

$$s = \sum_{i=1}^p c_i \varphi_i(t), \quad (7)$$

где $\varphi_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, p$, — базисные функции, обладающие свойством линейной независимости. Для упрощения вычислений структура базисных функций принимается достаточно простой. Требуется лишь, чтобы они являлись дважды непрерывно дифференцируемыми. Обычно используются базисные функции, представляющие собой целые степени времени [9, 10, 13, 15, 16, 23, 25]:

$$\begin{aligned} \varphi_1(t) &= 1, \varphi_2(t) = \tau, \varphi_3(t) = \tau^2, \\ \varphi_4(t) &= \tau^3, \dots, \varphi_p(t) = \tau^{p-1}, \end{aligned}$$

где $\tau = \frac{t-t_0}{t_f-t_0} = \frac{t-t_0}{T}$ ($T = t_f - t_0$), так что $\tau = 0$ при $t = t_0$ и $\tau = 1$ при $t = t_f$.

В этом случае (7) принимает вид

$$s = c_1 + c_2\tau + c_3\tau^2 + \dots + c_p\tau^{p-1}. \quad (8)$$

Могут применяться и другие функции, например гармонические $\varphi_i(t) = \sin(2\pi\tau)$, $\varphi_i(t) = \cos(2\pi\tau)$, экспоненциальные $\varphi_i(t) = e^{-\lambda_i\tau}$ [26, 27], сигмоидные $\varphi_i(t) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda_i\tau}}$ и прочие.

О качестве управления при полиномиальном описании траектории. Может возникнуть во-

прос, сопоставимо ли полиномиальное описание траектории со стремлением добиться не только терминальной точности, но и качества управляемого процесса в целом. Не окажется ли так, что построенное управление (путем решения обратной задачи динамики), хотя и будет терминальным, но вызовет неупорядоченный ход переходного процесса в системе при переводе ее из одного состояния в другое, выражающийся в наличии колебаний, реверсов, перерегулирования и других отклонениях процесса от нормативно плавной динамики. На этот вопрос отвечают соображения, изложенные в работе [9] и поясняемые ниже. Именно, по найденному из выражения (4) ускорению $a = \frac{d^2s}{dt^2}$ можно найти силу $F(t)$, вызывающую движение объекта по траектории (4):

$$F = ma(t). \quad (9)$$

В этом смысле силу $F(t)$ можно считать управляющей. В отношении вопроса о качестве осуществляемого ею управления в работе [9] показано, что полиномиальная зависимость силы $F(t)$ от времени, полученная из соотношения (8), благодаря которой происходит перевод объекта из начального фазового состояния в конечное, является оптимальной по критерию $I = \int_{t_0}^{t_f} u^2 dt$ при числе конечных условий, равном порядку системы из первых двух уравнений (1). Проще говоря, число варьируемых параметров $c_1, c_2, \dots, c_p$ полинома (8) не должно быть избыточно высоким. В этом случае принятый подход к поиску терминального управления, опирающийся на методы полиномиального планирования траектории и обратной задачи динамики, не противоречит общепринятым представлениям о качестве управления.

Вывод выражения для закона управления. Сила (9) осуществляет программный перевод объекта в заданное конечное состояние. Обеспечить закон изменения силы (9) можно попытаться посредством соответствующего изменения управляющего воздействия $u = u(t)$ в исходной системе (1). Рассмотрим задачу поиска этого управления. Она состоит в нахождении такой зависимости $u = u(t)$, которая приводит к изменению силы $F(t)$ по формуле (9), а значит, перемещению объекта по траектории (4).

Таким образом, с одной стороны мы имеем, что для осуществления движения по траекто-

рии (4) движущая механическая сила $F = ma$ должна изменяться по закону (9):

$$F = ma(t),$$

где $a(t)$ есть вторая производная от планируемой траектории (4) по времени.

С другой стороны, сила F создается энергетической частью системы (1), описываемой уравнениями относительно x_k . Поэтому она подчиняется известной зависимости от переменных состояния

$$F = F(t, s, v, x_1, \dots, x_n).$$

Следовательно, в каждый момент времени должно выполняться тождество

$$F(t, s, v, x_1, \dots, x_n) \equiv ma(t).$$

Для определения искомого закона управления $u = u(t)$ продифференцируем данное тождество по времени. Находим:

$$\frac{dF}{dt} = ma_t,$$

где

$$a_t = \frac{da}{dt},$$

а производная dF/dt сложной функции $F = F(t, s(t), v(t), x_1(t), \dots, x_n(t))$ есть

$$\frac{dF}{dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial s} \frac{ds}{dt} + \frac{\partial F}{\partial v} \frac{dv}{dt} + \sum_{k=1}^n \frac{\partial F}{\partial x_k} \frac{dx_k}{dt}.$$

Выразим ее через переменные состояния системы в силу уравнений (1). Имеем:

$$\frac{dF}{dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial s} v + \frac{\partial F}{\partial v} a + \sum_{k=1}^n \frac{\partial F}{\partial x_k} (f_k + b_k u).$$

Отсюда получаем

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial s} v + \frac{\partial F}{\partial v} a + \sum_{k=1}^n \frac{\partial F}{\partial x_k} (f_k + b_k u) = ma_t$$

и тогда

$$u \sum_{k=1}^n \frac{\partial F}{\partial x_k} b_k = ma_t - \frac{\partial F}{\partial t} - \frac{\partial F}{\partial s} v - \frac{\partial F}{\partial v} a - \sum_{k=1}^n \frac{\partial F}{\partial x_k} f_k.$$

Из последнего соотношения определяем искомое u :

$$u = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{\partial F}{\partial x_k} b_k} \left(ma_t - \frac{\partial F}{\partial t} - \frac{\partial F}{\partial s} v - \frac{\partial F}{\partial v} a - \sum_{k=1}^n \frac{\partial F}{\partial x_k} f_k \right).$$

Вводя удобные обозначения, окончательно запишем:

$$u = \frac{1}{\sum_{k=1}^n F_{x_k} b_k} \left(m a_t - F_t - F_s v - F_v a - \sum_{k=1}^n F_{x_k} f_k \right). \quad (10)$$

Здесь $a = \frac{d^2 s}{dt^2} = a(c_1, c_2, \dots, c_p, t)$ и $v = \frac{ds}{dt} = v(c_1, c_2, \dots, c_p, t)$ — заданные функции времени с постоянными параметрами $c_1, c_2, \dots, c_p$, подлежащими определению исходя из граничных условий (5), (6); $a_t = \frac{da}{dt} = a_t(c_1, c_2, \dots, c_p, t)$; $F_t = \frac{\partial F}{\partial t} = F_t(t, s, v, x_1, \dots, x_n)$; $F_s = \frac{\partial F}{\partial s} = F_s(t, s, v, x_1, \dots, x_n)$; $F_v = \frac{\partial F}{\partial v} = F_v(t, s, v, x_1, \dots, x_n)$; $F_{x_k} = \frac{\partial F}{\partial x_k} = F_{x_k}(t, s, v, x_1, \dots, x_n)$ — известные функции своих аргументов, определяемые как частные производные функции F по этим аргументам.

Формула (10) дает закон искомого терминального управления объектом, описываемым нелинейными уравнениями (1), в форме обратной связи.

В частности, если использовать полиномиальную зависимость (8) для описания планируемой траектории, то неизвестные коэффициенты $c_1, c_2, \dots, c_p$ должны удовлетворять следующим уравнениям, вытекающим из выражений (5), (6) для данного случая:

$$\begin{aligned} c_1 &= s_0, \quad c_2 = T v_0, \\ c_1 + c_2 + \dots + c_p &= s_f, \\ c_2 + 2c_3 + \dots + (p-1)c_p &= T v_f, \\ 2c_3 &= T^2 F(t_0)/m. \end{aligned}$$

Проводя простые выкладки, находим, например, из этих уравнений:

$$\begin{aligned} c_1 &= s_0, \quad c_2 = v_0 T, \quad c_3 = \frac{1}{2} a_0 T^2, \\ c_4 &= 4d_2 - T d_1, \quad c_5 = -(3d_2 - T d_1), \end{aligned}$$

где

$$d_1 = v_f - v_0 - a_0 T - [5c_6 + 6c_7 + \dots + (p-1)c_p]/T,$$

$$d_2 = s_f - s_0 - v_0 T - a_0 \frac{T^2}{2} - c_6 - c_7 - \dots - c_p,$$

$c_6, c_7, \dots, c_p$ — свободные параметры.

После определения коэффициентов планируемая траектория выражается окончательной зависимостью от времени (8), в которой коэффициенты $c_1, c_2, \dots, c_5$ уже известны, а остальные $c_6, c_7, \dots, c_p$ — свободны.

Выражение для закона управления (10) имеет вид дроби, и ее знаменатель, вообще говоря, может обращаться в нуль в какие-то моменты времени для конкретной системы. В этом случае, исходя из опыта автора, следует подыскивать иную траекторию сближения или сшить ее из отдельных участков либо "заморозить" управление в окрестности нуля. Эти приемы обычно позволяют преодолеть отмеченное затруднение. Кроме того, известные препятствия могут возникать ввиду нелинейного характера задачи, не обязавшей иметь решение на заданном промежутке времени. Данные вопросы являются предметом дальнейших исследований.

Тем не менее, во многих практически важных задачах удается подобрать приемлемую траекторию и добиться целевого управления, переводящего объект в заданное состояние по положению и скорости.

Управление электромагнитным приводом

Задача "мягкого" поворота вала электропривода. В качестве иллюстративного примера рассмотрим управление "мягким" поворотом вала электрического привода постоянного тока на заданный угол, т.е. таким поворотом, при котором скорость в конечный момент времени поворота $t = t_f$ становится равной нулю:

$$v_f = v(t_f) = 0.$$

Подобное управление имеет практическое значение в ряде актуальных технических задач, включая и те, которые были перечислены выше.

Электромеханические уравнения электропривода. Электропривод (ЭП) содержит в своем составе электродвигатель постоянного тока (Дв), редуктор (Р) и тахогенератор (Тг). Остановимся на ЭП с двигателем последовательного возбуждения, при котором его обмотка возбуждения (ОВ) и якорная цепь соединены последовательно, как показано на рис. 1.

Введем параметры ЭП:

U — электрическое напряжение, приложенное к обмоткам ЭП;

I — электрический ток в цепи обмоток;

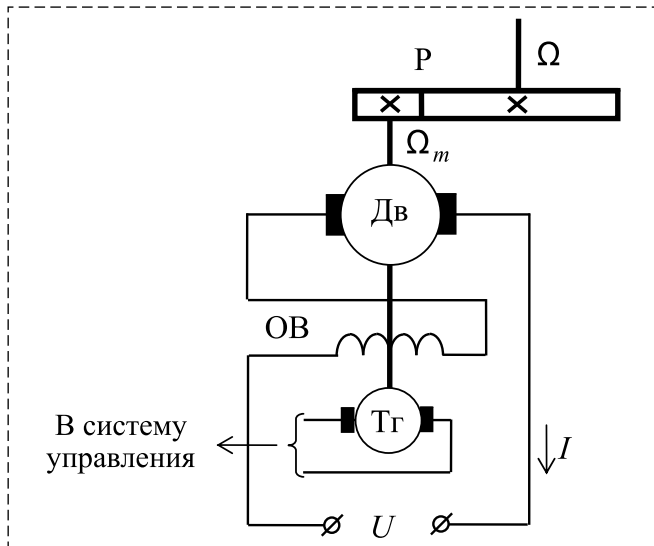


Рис. 1. Схема электропривода с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения

Fig. 1. Diagram of an electric drive with a DC motor of sequential excitation

R_a и L_a — активное сопротивление и индуктивность якорной обмотки;

R_e и L_e — активное сопротивление и индуктивность обмотки возбуждения;

Ω_m — угловая скорость вращения вала двигателя;

k_r — коэффициент передачи редуктора;

$\Omega = \Omega_m/k_r$ — угловая скорость вращения выходного вала ЭП;

$J = J_m k_r^2 + J_r$ — приведенный момент инерции вала ЭП (J_m и J_r — моменты инерции вала двигателя и редуктора);

$\Phi = c_e I$ — магнитный поток возбуждения;

$E_a = c_m \Phi \Omega_m = c_m \Phi k_r \Omega = c_m c_e k_r \Omega I$ — ЭДС реакции якоря, пропорциональная потоку возбуждения Φ и скорости Ω_m ;

$M_m = c_m \Phi I = c_m c_e I^2$ — вращающий магнитный момент;

$M_{fr} = -C_{fr} \Omega$ — момент трения валов двигателя и редуктора;

$C_{fr} = C_{fr_m} k_r^2 + C_{fr_r}$ — коэффициент вязкого трения (C_{fr_m} и C_{fr_r} — коэффициенты трения валов двигателя и редуктора).

Электромеханические уравнения рассматриваемого ЭП в нормальной форме Коши имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi}{dt} &= \Omega; \\ \frac{d\Omega}{dt} &= -a_{01}\Omega + a_{02}I^2; \\ \frac{dI}{dt} &= -a_{11}I - a_{12}\Omega I + b_1U, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{где } a_{01} = \frac{C_{fr}}{J}, \quad a_{02} = \frac{k_r c_m c_e}{J}, \quad a_{11} = \frac{R_a + R_e}{L_a + L_e},$$

$$a_{12} = \frac{c_m c_e k_r}{L_a + L_e}, \quad b_1 = \frac{1}{L_a + L_e}.$$

В терминах системы уравнений (1) параметры ЭП как объекта управления определяются выражениями

$$s = \Psi, \quad v = \Omega, \quad x_1 = I, \quad u = U, \quad m = 1,$$

$$F = -a_{01}v + a_{02}x_1^2, \quad f_1 = -a_{11}x_1 - a_{12}vx_1.$$

Закон терминального управления ЭП. Согласно выражению (10) управляющее воздействие $u = u(t)$, приводящее к повороту вала ЭП из начального положения (2) в конечное (3), описывается формулой

$$u = \frac{1}{F_{x_1} b_1} (m a_t - F_v a) - \frac{f_1}{b_1}, \quad (12)$$

где

$$F_v = \frac{\partial F}{\partial v} = -a_{01}, \quad F_{x_1} = \frac{\partial F}{\partial x_1} = 2a_{02}x_1.$$

Планирование траектории при "мягком" повороте вала ЭП. С помощью уравнений (11), в которых управляющее напряжение U подчиняется закону (12), проведем расчет поворота выходного вала ЭП с электродвигателем типа 2ПФ132ЛГУХЛ4.

Параметры электродвигателя и редуктора характеризуются следующими значениями: $R_a = 0,269$ Ом, $L_a = 5,7 \cdot 10^{-3}$ Гн, $R_e = 25$ Ом, $L_e = 6,339$ Гн, $k_r = 100$, $J_m = 0,048$ кг·м², $J_r = 0,0096$ кг·м², $c_m = 181$ В·с/рад.

Поставим задачу "мягкого" поворота вала на заданный угол $\Delta\Psi$ под действием управляющего напряжения $U = U(t)$. Скорость вала в начальном и конечном положениях примем равной нулю. Данная задача соответствует наложению на уравнения (11) граничных условий

$$\begin{aligned} \Psi(t_0) &= \Psi_0, \quad \Psi(t_f) = \Psi_f, \quad \Psi_f - \Psi_0 = \Delta\Psi, \\ \Omega(t_0) &= \Omega_0 = 0, \quad \Omega(t_f) = \Omega_f = 0, \end{aligned}$$

где $t = t_0$ — начальный момент времени поворота, $t = t_f$ — конечный момент.

Возьмем для определенности

$$\Psi_0 = 0, \quad \Psi_f = 2 \text{ рад}, \quad \Delta\Psi = 2 \text{ рад}.$$

Для упрощения планирования траектории разобьем процесс на две фазы: от $t = t_0$ до $t = t_f/2 = T$ и от $t = t_f/2 = T$ до $t = t_f = 2T$ (рис. 2). На первой фазе осуществим поворот вала на

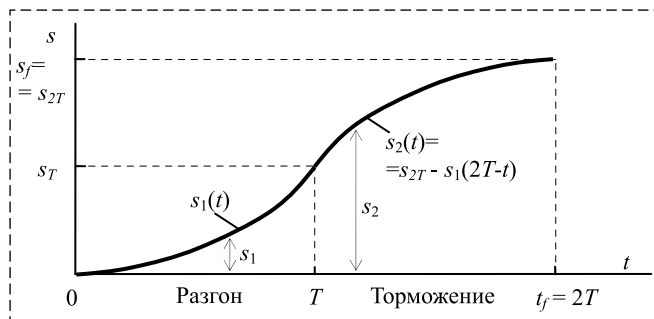


Рис.2. Две фазы зеркальной траектории
Fig. 2. Two phases of the mirror trajectory

угол $\Delta\psi/2 = s(T) = s_T = s_f/2$ путем разгона его до какой-либо приемлемой конечной скорости $v(T) = v_T > 0$. На второй фазе — поворот еще на $\Delta\psi/2 = s(2T) = s_{2T} = s_f$ с торможением до нулевой скорости $v(2T) = v_{2T} = v_f = 0$. Торможение вала электродвигателя последовательного возбуждения осуществляется посредством инверсии тока в одной из его обмоток с помощью мостовой переключательной схемы. При этом вращающий магнитный момент $M_m = c_m c_e I^2 = Ja_{02} I^2$ и ЭДС реакции якоря $E_a = c_m c_e k_r \Omega I = (L_a + L_e) a_{12} \Omega I$ изменяют свои направления на противоположные: $M_m = -Ja_{02} I^2$, $E_a = -(L_a + L_e) a_{12} \Omega I$.

Соотношения зеркальной кинематики. Если разгон на первой фазе происходит по некоторому закону

$$s_1 = s_1(t), 0 \leq t \leq T,$$

то торможение на второй фазе естественно выполнить по обратному, зеркальному, закону

$$s_2(t) = 2s_T - s_1(2T - t), T \leq t \leq t_f = 2T.$$

При этом путь на второй фазе от момента $t = T$ до момента $t = T + \Delta t$, $\Delta t > 0$ будет составлять

$$\begin{aligned} s_2(T + \Delta t) - s_2(T) &= s_2(T + \Delta t) - s_T = \\ &= 2s_T - s_1(2T - (T + \Delta t)) - s_T = s_T - s_1(T - \Delta t), \end{aligned}$$

т.е. равен пути на первой фазе от момента $t = T - \Delta t$ до момента $t = T$. Таким образом, пути, проходимые за промежутки времени, равно отстоящие от границы фаз — момента $t = T$, одинаковы (рис. 2). Иными словами, вторая фаза зеркальна первой.

Аналогично скорости одинаковы по модулю в моменты времени, равно отстоящие от границы фаз — момента $t = T$:

$$v_2(t) = v_1(2T - t) \text{ и } v_2(T + \Delta t) = v_1(T - \Delta t)$$

а ускорения одинаковы по модулю и противоположны по знаку в эти моменты:

$$a_2(t) = -a_1(2T - t) \text{ и } a_2(T + \Delta t) = -a_1(T - \Delta t).$$

Производные от ускорения в эти моменты тоже одинаковы (как и скорости):

$$a_{t2}(t) = a_{t1}(2T - t) \text{ и } a_{t2}(T + \Delta t) = a_{t1}(T - \Delta t).$$

Степенная траектория. Разгон на первой фазе проведем по траектории

$$s_1 = s_T \tau^n = s_T \frac{t^n}{T^n}, \quad (13)$$

где $\tau = \frac{t}{T}$ при $t_0 = 0$.

Производные функции (13) по времени t суть

$$v_1 = s_T n \frac{t^{n-1}}{T^n};$$

$$a_1 = s_T n(n-1) \frac{t^{n-2}}{T^n};$$

$$a_{1t} = s_T n(n-1)(n-2) \frac{t^{n-3}}{T^n}.$$

Торможение на второй фазе осуществим согласно записанным выше зеркальным соотношениям

$$s_2(t) = 2s_T - s_1(2T - t) = 2s_T - s_T \frac{(2T - t)^n}{T^n};$$

$$v_2(t) = v_1(2T - t) = s_T n \frac{(2T - t)^{n-1}}{T^n}; \quad (14)$$

$$a_2(t) = -a_1(2T - t) = -s_T n(n-1) \frac{(2T - t)^{n-2}}{T^n};$$

$$a_{2t}(t) = a_{1t}(2T - t) = s_T n(n-1)(n-2) \frac{(2T - t)^{n-3}}{T^n}.$$

Примем $n = 3$, $t_f = 2$ с, $T = t_f/2 = 1$ с.

Численные расчеты. Численно интегрируя систему дифференциальных уравнений (11) при управляющем воздействии (12), степенной траектории на первой фазе (13), а на второй фазе — (14) и заданных начальных условиях $\psi_0 = 0$, $\Omega_0 = 0$, $I_0 = 0$, получим процессы управления ЭП. Во избежание деления на ноль в начальный момент времени в соотношении (12) несколько сдвигаем от нуля начальное значение тока: $I_0 = 0,001$ А. Практически это соответствует началу управления с небольшим запаздыванием после включения питания.

Результаты расчетов представлены на рис. 3—7. Из графика изменения угла поворо-

та вала ЭП во времени на рис. 3 понятно, что поставленная задача выполнена. Осуществлен поворот вала на заданный угол 2 рад за требуемое время 2 с с нулевой скоростью в конечный момент времени поворота. Торможение на второй фазе движения (уменьшение скорости вращения вала, см. рис. 4) достигается за счет реверса вращающего момента (см. рис. 5). Ско-

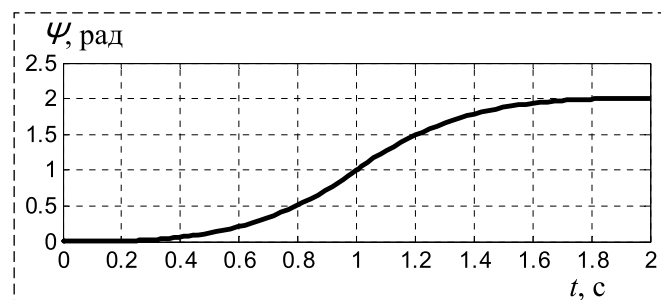


Рис. 3. "Мягкий" поворот вала ЭП на угол $\Delta\psi = 2$ рад
Fig. 3. "Soft" turn of the electric drive shaft at an angle $\Delta\psi = 2$ rad

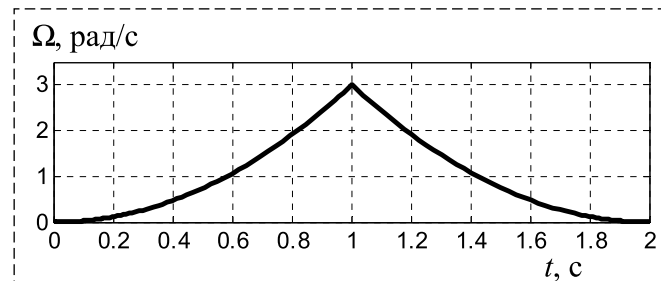


Рис. 4. Угловая скорость Ω вала ЭП при "мягком" повороте
Fig. 4. Angular velocity Ω of the electric drive shaft at a "soft" turn

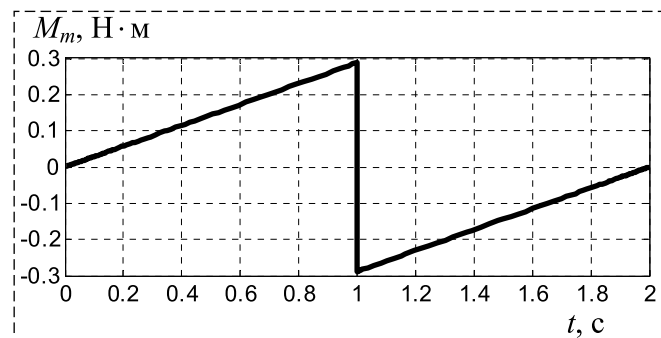


Рис. 5. Вращающий магнитный момент M_m
Fig. 5. The rotating magnetic moment M_m

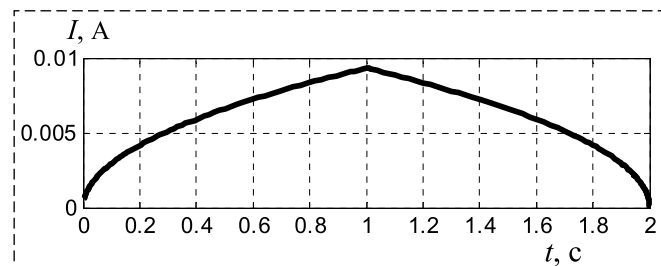


Рис. 6. Сила электрического тока I в обмотках
Fig. 6. Electric current I in the windings

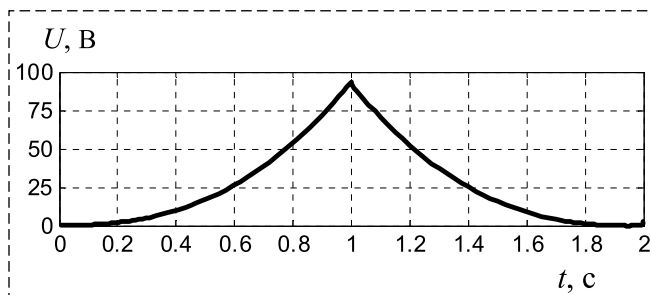


Рис. 7. Управляющее напряжение U
Fig. 7. Control voltage U

рость вращения вала лежит в приемлемых пределах (см. рис. 4), а перегрузок по силе тока и напряжению не наблюдается (рис. 6, 7). Таким образом, качество управления отвечает нормативным инженерным требованиям.

Заключение

В статье изложен метод синтеза терминального управления одноосным механическим движением нелинейных объектов. Построенное с его помощью управление обеспечивает перемещение объекта из известного начального положения и при известной начальной скорости и других начальных значениях параметров состояния в заданное конечное положение с заданной конечной скоростью. Остальные параметры состояния объекта в конечный момент времени в общем случае не контролируются.

Метод характеризуется простотой воплощения как в отношении формы закона управления, так и его практической реализации, например, с помощью встраиваемых микроконтроллеров. Это позволяет существенно упростить осуществление терминального управления мягким позиционированием подвижных исполнительных органов разнообразных технических объектов: промышленных роботов, манипуляторов, автооператоров, станков и других, избегая применения жестких упоров.

Известным неудобством метода в отдельных случаях может оказаться необходимость выполнения операции деления при вычислении закона управления, когда делитель обращается в нуль в какой-то момент времени. Однако оно преодолевается, как правило, путем выбора иной планируемой траектории или ее сшиванием из отдельных участков или "замораживанием" управления в малой окрестности нуля. Данный вопрос является предметом дальнейших исследований.

Список литературы

1. Александров В. В., Болтянский В. Г., Лемак С. С., Парусников Н. А., Тихомиров В. М. Оптимальное управление движением. М.: Физматлит, 2005. 376 с.
2. Афанасьев В. Н. Оптимальные системы управления. Аналитическое конструирование. М.: Изд-во физического факультета МГУ, 2011. 170 с.
3. Летов А. М. Динамика полета и управление. М.: Наука, 1969. 360 с.
4. Бек В. В., Вишняков Ю. С., Махлин А. Р. Интегрированные системы терминального управления. М.: Наука, 1989. 224 с.
5. Лебедев Г. Н., Ву С. Х. Логика комплексированного терминального управления летательным аппаратом с помощью линейного и релейного регуляторов // Электронный журнал "Труды МАИ". 2013. Вып. 70. URL: www.mai.ru/science/trudy/
6. Половинчук Н. Я., Иванов С. В., Жукова М. Ю., Белоножко Д. Г. Способ терминального управления на участке выведения беспилотного летательного аппарата с баллистической фазой полета // Вестник Донского государственного университета. 2019. Т. 19, № 1. С. 93–100.
7. Козырев А. В. Асимптотически точное оптимальное управление конечным положением по части вектора состояния // Оптимизация производственных процессов. Сб. науч. тр. СевГТУ. 2001. Вып. 4. С. 110–114.
8. Зубов Н. Е., Ли М. В., Ли Е. К., Микрин Е. А., Рябченко В. Н. Алгоритм синтеза терминального управления выставкой космического аппарата в инерциальную систему координат // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 1. С. 57–66.
9. Батенко А. П. Управление конечным состоянием движущихся объектов. М.: Сов. радио, 1977. 256 с.
10. Батенко А. П. Системы терминального управления. М.: Радио и связь, 1984. 160 с.
11. Крутько П. Д. Алгоритмы терминального управления линейных динамических систем // Известия РАН. Теория и системы управления. 1998. № 6. С. 33–45.
12. Крутько П. Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. М.: Машиностроение, 2004. 576 с.
13. Жевнин А. А., Колесников К. С., Крищенко А. П., Толлоков В. И. Синтез алгоритмов терминального управления на основе концепций обратных задач динамики (обзор) // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1985. № 4. С. 180–188.
14. Хрусталева М. М. Методы теории инвариантности в задачах синтеза законов терминального управления летательными аппаратами. М.: Изд-во МАИ. 1987. 51 с.
15. Велищанский М. А. Синтез квазиоптимальной траектории движения беспилотного летательного аппарата // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 12. С. 417–430.
16. Канатников А. Н., Шмагина Е. А. Задача терминального управления движением летательного аппарата // Нелинейная динамика и управление. 2010. С. 79–94.
17. Легенький В. И. О построении систем управления с инвариантной программой // Математические машины и системы. 2004. № 1. С. 115–121.
18. Теряев Е. Д., Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б., Петрин К. В. Концепция "гибких кинематических траекторий" в задачах терминального управления подвижными объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 12. С. 7–15.
19. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Методы "гибких" траекторий в задачах терминального управления вертикальными маневрами летательных аппаратов // Проблемы управления сложными динамическими объектами авиационной и космической техники. Гл. 2 / Под ред. С. Н. Васильева. М.: Машиностроение, 2015. С. 51–110.
20. Никифоров В. М., Сапожников А. И., Вязов С. М. Аналитическое конструирование терминального регулятора динамических систем управления согласно векторно-матричному методу В. Н. Бородовского // Тр. ФГУП "НПЦ АП им. акад. Н. А. Пилюгина". Системы и приборы управления. 2008. № 2(4). С. 60–75.
21. Бородовский В. Н., Никифоров В. М. Терминальное управление процессом начальной выставки гироскопов летательного аппарата в горизонт // МАК-2000. Москва, 2000.
22. Разоренов Г. Н. Метод синтеза законов "мягкого" и "сверхмягкого" управления конечным состоянием динамических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 4. С. 2–11.
23. Танг Тхань Лам. Системный анализ и оптимизация режимов полета для управления летательным аппаратом: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.13.01 — системный анализ, управление и обработка информации. М.: Московский физико-технический институт (государственный университет). 2015. 155 с.
24. Попов А. Н. Методы планирования траектории движения беспилотного летательного аппарата // Известия Самарского научного центра РАН. 2017. Том 19, № 1 (2). С. 364–370.
25. Солодовников В. В., Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Метод фазового пространства в задачах управления линейными конечномерными объектами // Автоматика. 1981. № 2. С. 55–67.
26. Котик М. Г. Динамика взлета и посадки самолетов. М.: Машиностроение, 1984. 256 с.
27. Мерриэм К. У. Теория оптимизации и расчет систем управления с обратной связью. М.: Мир, 1967. 549 с.

Synthesis of the Additive Terminal Control of Uniaxial Motion of Nonlinear Objects

V. G. Kozyrev, vldr.kzrv@yandex.ru

Sevastopol State University, Department of Computer Science and Control in Technical Systems,
Sevastopol, 299053, Russian Federation,

Corresponding author: Kozyrev V. G., PhD, Associate Professor,
Sevastopol State University, Department of Computer Science and Control in Technical Systems,
Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: vldr.kzrv@yandex.ru

Accepted on March 10, 2020

Abstract

A method for synthesizing the laws of terminal control of uniaxial movement of nonlinear dynamic objects is proposed. The problem is solved for the case when the control action is included in the scalar additive component of the nonlinear equations of the object. Target control laws meet the requirement to transfer an object from an arbitrary initial state to

a specified final position with a specified final speed. The other parameters of the object's state at the end time are generally not controlled. When assigning a zero final speed, the object's "soft" transition to the specified position is achieved, which is necessary for many terminal systems. Due to the fundamental complexity of optimal synthesis in conditions where the control object has nonlinear properties, a purely terminal formulation of the problem is preferable. One of the most effective means of solving this problem is the methods of trajectory planning and solving inverse dynamics problems. This approach is adopted in this study. Using it together with additional analysis allowed us to write the control law in the feedback form for the case of a nonlinear mathematical model of the object. The developed synthesis method is characterized by simplicity of form and ease of practical implementation, for example, using embedded microcontrollers. Known general approaches are usually associated with a significant expenditure of time and technical resources of the control system in this case. The specified efficiency of the method is achieved by taking into account the features of scalar and additive control in the system. The use of the method is illustrated by an example of "soft" turn of the sequential excitation electric motor shaft at a given angle with zero final speed, which does not require the use of rigid stop. The latter circumstance means a significant improvement in the quality of terminal control. Under this condition, the organization of positioning of mobile executive bodies of various industrial equipment is significantly simplified.

Keywords: terminal control, the inverse problem of dynamics, trajectory planning, "soft" turning the shaft of the electric motor

For citation:

Kozyrev V. G. Synthesis of the Additive Terminal Control of Uniaxial Motion of Nonlinear Objects, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 7, pp. 394—403.

DOI: 10.17587/mau.21.394-403

References

1. Alexandrov V. V., Lemah S. S., Parusnikov N. A., Tikhomirov V. M., Boltiansky V. G. Optimal motion control, Moscow, Fizmatgiz, 2005, 376 p. (in Russian).
2. Afanasyev V. N. Optimal control systems. Analytical design, Moscow, Publishing house of fizicheskii fakul'tet MSU, 2011, 170 p. (in Russian).
3. Letov A. M. Flight dynamics and control, Moscow, Nauka, 1969, 360 p. (in Russian).
4. Bek V. V., Vishniakov Iu. S., Makhlin A. R. Integrated terminal control systems, Moscow, Nauka, 1989, 224 p. (in Russian).
5. Lebedev G. N., Vu S. H. Logic of the integrated terminal aircraft control by means of the linear and relay controllers, *Ehlektronnyy zhurnal "Trudy MAI"*, 2013, iss. 70, available at: www.mail.ru/science/trudy/ (in Russian).
6. Polovinchyuk N. Ya., Ivanov S. V., Zhukova M. Yu., Belonozhko D. G. Method of terminal control in the area of launching an unmanned aerial vehicle with a ballistic phase of flight, *Vestnik Donskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 93—100 (in Russian).
7. Kozyrev A. V. Asymptotically exact optimal control of the final position on the part of the state vector, *Optimizatsiya proizvodstvennykh protsessov. Sbornik nauchnykh trudov SevGTU*, no. 4, Sevastopol, Publishing house of SevGTU, 2001, pp. 110—114 (in Russian).
8. Zubov N. E., Li M. V., Li E. K., Mikrin E. A., Ryabchenko V. N. Algorithm for synthesis of terminal control of the spacecraft exhibition into an inertial coordinate system, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 57—66 (in Russian).
9. Batenko A. P. Control of the final state of moving objects, Moscow, Sovetskoe radio Soviet radio, 1977, 256 p. (in Russian).
10. Batenko A. P. Terminal control systems., Moscow, Radio i Sviaz, 1984, 160 p. (in Russian).
11. Krutko P. D. Terminal control algorithms for linear dynamical, *Izvestiia RAN. Teoriia i Sistemy Upravleniia*, 1998, no. 6, pp. 33—45 (in Russian).
12. Krutko P. D. Inverse problems of dynamics in the theory of automatic control, Moscow, Mashinostroenie, 2004, 576 p. (in Russian).
13. Zhevnin A. A., Kolesnikov K. S., Krishenko A. P., Tolokonov V. I. Synthesis of terminal control algorithms based on the concepts of inverse dynamics problems (overview), *Izv. AN SSSR. Tekhn. Kibernetika*, 1985, no. 4, pp. 180—188 (in Russian).
14. Khrustalev M. M. Methods of invariance theory in problems of synthesis of laws of terminal control of aircraft, Moscow, Publishing house of MAI, 1987, 51 p. (in Russian).
15. Velishchanskii M. A. Synthesis of quasi-optimal trajectory of unmanned aerial vehicle, *Nauka i Obrazovanie. MGTU im. N E Bauman Elektronnyi zhurnal*, 2013, no. 12, pp. 417—430 (in Russian).
16. Kanatnikov A. N., Shmagina E. A. The problem of terminal control of the movement of the aircraft, *Nelineinaya Dinamika i Upravlenie*, 2010, pp. 79—94 (in Russian).
17. Legenkii V. I. On the construction of control systems with invariant program, *Matematicheskie Mashiny i Sistemy*, 2004, no. 1, pp. 115—121 (in Russian).
18. Teryaev E. D., Filimonov A. B., Filimonov N. B., Petrin K. B. The concept of "flexible kinematic trajectories" in the problems of terminal control of mobile objects, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2011, no. 12, pp. 7—15 (in Russian).
19. Filimonov A. B., Filimonov N. B. Methods of "flexible" trajectories in problems of terminal control of vertical maneuvers of aircraft. Chapter 2 in the monograph "Problems of controlling complex dynamic objects of aviation and space technology", Moscow, Mashinostroenie, 2015, pp. 51—110 (in Russian).
20. Nikiforov V. M., Sapozhnikov A. I., Viazov S. M. Analytical design of the terminal controller of dynamic control systems according to the vector-matrix method of V. N. Borodovskii, *Trudy FGUP "NPTS AP im akad N A Piliugina". Sistemy i Pribory Upravleniia*, 2008, no. 2(4), pp. 60—75 (in Russian).
21. Borodovskii V. N., Nikiforov V. M. Terminal control of the initial exposure of the aircraft's gyro platform in the horizon, MAK-2000, Moscow, 2000 (in Russian).
22. Razorenov G. N. Method of synthesis of the laws of "soft" and "super-soft" control of the final state of dynamical systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2011, no. 4, pp. 2—11 (in Russian).
23. Tang Tkhon Lam. System analysis and optimization of flight modes for aircraft control: dissertatsiia na soiskanie uchenoi stepeni kand tekhn nauk: 05 13 01 — sistemnyi analiz upravlenie i obrabotka informatsii, Moscow, Moskovskii fiziko-tekhnicheskii institut (gosudarstvennyi universitet), 2015, 155 p. (in Russian).
24. Popov A. N. Methods of planning the trajectory of an unmanned aerial vehicle, *Izvestiia Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN*, 2017, vol. 19, no. 1 (2), pp. 364—370 (in Russian).
25. Solodovnikov V. V., Filimonov A. B., Filimonov N. B. Phase space method in control problems for linear finite-dimensional objects, *Avtomatika*, 1981, no. 2, pp. 55—67 (in Russian).
26. Kotic M. G. Dynamics of take-off and landing of aircraft, Moscow, Mashinostroenie, 1984, 256 p. (in Russian).
27. Merriam C. W. Optimization theory and calculation of feedback control systems, Moscow, Mir, 1967, 549 p. (in Russian).

В. В. Серебранный, канд. техн. наук,
зав. кафедрой "Робототехнические системы и мехатроника", vsereb@bmstu.ru,
МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва

Коллаборативные мультиагентные системы — альтернатива полной автоматизации производства

Предложен подход, отвечающий современным экономическим трендам и являющийся альтернативой полной автоматизации процессов, основанный на использовании коллаборативных мультиагентных систем (КМАС). В данной концепции люди и роботы рассматриваются как агенты в едином сенсорно-информационном поле, являющиеся исполнителями поставленных задач в рамках достижения целей функционирования коллаборативной мультиагентной системы.

Актуальность КМАС обусловлена тем, что возможности промышленного использования полностью автоматизированных многокомпонентных систем ограничены финансовой и инфраструктурной неготовностью различных производств к переходу на полностью безлюдные технологии. Предлагаемый подход сочетает самые последние, но остающиеся вполне окупаемыми достижения техники наряду с высококвалифицированным трудом человека. Использование КМАС будет экономически оправдано при изготовлении продукции малыми сериями, в условиях быстрой сменяемости продуктовых линеек, а также наличия дефицита персонала. В статье показано, что такой подход может позволить существенно снизить затраты на автоматизацию, обеспечив при этом выполнение заданных показателей производства.

Данный подход позволяет по-новому взглянуть на человека, рассматривая его и робота как равноценных партнеров внутри коллаборативной системы в рамках выполнения поставленных задач. В работе сформулированы и представлены основные понятия и отличительные характеристики КМАС, даны обоснования их применения.

Создание нового класса КМАС требует решения ряда проблем, связанных со взаимодействием человека и робота. Рассмотрены вопросы, связанные с работой человека внутри коллаборативной системы, с рациональным разделением функций человека и автоматизированной производственной системы в соответствии с необходимым уровнем коллаборации. Включение человека с его психоэмоциональными и физическими особенностями как равноценного агента КМАС обуславливает трудности формализации КМАС, связанные с необходимостью учета этих особенностей, создания сенсорно-информационной системы. В работе рассмотрены возможные способы формализации КМАС и подходы к управлению.

Ключевые слова: автоматизация производств, коллаборативная робототехника, мультиагентное управление, сенсорно-информационная сеть

Введение

Повышение производительности производства в различные периоды истории человечества происходило за счет удельного роста ручного труда, вкладываемого в создание производимого продукта. При росте спроса на некоторый продукт возникала необходимость его массового тиражирования. Несовершенство технологии производства при этом приводило к определенным издержкам. Примером может служить перемещение рабочих при изготовлении какого-либо технического устройства и ожидания очереди для доступа к нему на конечном этапе производства для проведения своих операций. Радикальным средством для устранения подобного неэффективного процесса явилось введение конвейерной линии. Удельная производительность труда резко возросла

за счет ликвидации временных потерь на дополнительные перемещения и ожидания рабочих. При этом, если раньше продукт создавался одним мастером или очень ограниченным кругом участников, являющихся носителями всех знаний и умений по созданию этого продукта, то затем процесс создания изделия распался на отдельные технологические операции, следующие друг за другом. Значимость труда отдельного исполнителя резко упала. Человек теперь выполнял в ритме работы конвейера простые, монотонные операции. По существу, он превратился в придаток автоматизированной системы. Возможности человека уже не находили применения, а его труд, монотонный и малоквалифицированный, приводил к быстрой потере здоровья и трудоспособности, отрицательно влиял на психику рабочего. Дальнейшее совершенствование технологии производства, связанное

с декомпозицией технологических процессов на более простые составляющие с представлением всех сложных процессов в виде взаимосвязанных конечных операций, привело, в свою очередь, к автоматизации всего технологического процесса.

Развитие автоматизации полностью соответствует основному принципу диалектики: "теза — антитеза — синтез". Действительно, тезой можно считать ручной труд, который на заводах Форда в начале 20-го века был дополнен конвейером. Антитезой стала глобальная автоматизация, ставящая целью полное вытеснение человека из процесса производства. К концу 20-го века в Европе появляются полностью роботизированные цеха и целые предприятия, в том числе, в автомобильном производстве. По существу, современная техника позволяет решить любую задачу автоматизации с использованием роботов, новых технологий и способов обработки информации [1]. Иногда этот процесс называют цифровизацией производства, имея в виду использование компьютерных устройств и современных средств передачи информации. Однако здесь уже возникают ограничения экономического характера. Новые технологии удорожают производство и, начиная с некоторого уровня, становятся экономически не выгодными. Само собой, эта "граница автоматизации" все время меняется с развитием техники и с изменением потребностей общества. Но она активно существует [2].

При этом необходимо помнить, что решения по автоматизации всегда сопряжены со значительными финансовыми затратами, связанными с проектированием, изготовлением и внедрением средств автоматизации. В ряде случаев подобные инвестиции, направленные на перевод производства на более высокий уровень, оправданы. В других же случаях, например, для малых предприятий или при ограниченном размере партии выпускаемой продукции, они окупаться не будут. При этом требования рынка по качеству продукции, скорости ее выхода в продажу, повторяемости изделий диктуют условия непрерывного развития производственных систем.

Возвращаясь к диалектике развития производства, можно предположить, что синтезом послужат коллаборативные мультиагентные системы (КМАС), в которых применяются самые последние, но остающиеся вполне окупаемыми, достижения техники наряду с высококвалифицированным трудом человека. Подход на основе КМАС является новым подходом

к автоматизации производств, отвечающим современным экономическим тенденциям.

В данной статье сформулированы и представлены основные понятия и отличительные характеристики КМАС, даны обоснования их применения с учетом отсутствия в некоторых случаях альтернативных вариантов построения производственных систем. Рассмотрены вопросы, связанные с работой человека внутри коллаборативной системы, приведены возможные способы формализации КМАС и подходы к управлению.

Определение и основные характеристики КМАС

В последнее время в робототехнике возникло новое бурно развивающееся направление — коллаборативная робототехника (КР) [3, 16]. Первоначально под коллаборативной робототехнической системой (КРТС) понимали производственные системы, в которых люди и роботы работают в одном рабочем пространстве. Однако в дальнейшем область применения КРТС в промышленности расширилась. К КРТС можно отнести и автоматические транспортные средства (робокары), которые также функционируют в одном рабочем пространстве с людьми. Сюда же относятся различные автоматизированные средства поддержки работы человека, в том числе, манипуляционные средства загрузки технологического оборудования, роботизированные системы технической диагностики, различные манипуляторы-ассистенты рабочих.

КМАС определяют более широкий класс производственных систем, чем КРТС. Введем определение КМАС.

Определение. КМАС — это производственные компьютеризированные и роботизированные системы, образованные несколькими взаимодействующими агентами, в которых люди и роботы функционируют в рамках одного технологического процесса, выполняя в нем одновременно каждый свои собственные функции для решения общих задач.

Заметим, что робот и человек являются равноценными агентами КМАС. Действительно, оператор роботизированной гибкой производственной системы (ГПС), взаимодействуя с вычислительными средствами, выполняя задачи контроля и организации всего производственного цикла, включающего и манипуляционные роботы, и традиционные ме-

ханообработывающие ГПС, и внутрицеховой транспорт, также является частью производственной коллаборативной системы, но более высокого уровня по сравнению с оператором КР, где человек, являясь субъектом системы, выполняет технологические операции в зоне работы робота и одновременно с ним.

Выделим основные требования к КМАС:

1) возможность выполнения этой системой части функций, например, оперативного управления системой, постановки новых задач и т.п., ранее выполнявшихся человеком, что, в свою очередь, предполагает использование элементов искусственного интеллекта при решении задач управления и обработки информации;

2) доступность работы с ней человека, учет его объективных психофизиологических возможностей;

3) безопасность работы с КМАС, как физическая и психологическая по отношению к человеку, так и информационная по отношению к системе в целом.

Еще раз подчеркнем, что возможности промышленного использования полностью автоматизированных систем, состоящих из многокомпонентных робототехнических систем или групп роботов в рамках программ модернизации экономики РФ ограничена финансовой и инфраструктурной неготовностью производств к переходу на полностью безлюдные технологии и отсутствием отечественной технологической базы для изготовления прецизионных элементов конструкции робототехнических систем.

Заметим, что этот вывод справедлив не только для промышленного производства, но, возможно, в большей мере и для решения специальных задач (при одновременном и "равноправном" участии людей и роботов в операциях силовых ведомств, МЧС), задач сельского хозяйства, горнодобывающей промышленности, роботизированного транспорта и т.п.

Конечно, применительно к промышленному производству это положение не является абсолютным. Если технологический процесс полностью декомпозируется на простые операции, и при этом не предъявляются высокие требования к сложности и уникальности технических систем, предназначенных для реализации этих процессов, а все этапы производства автоматизируемы с помощью апробированных и оптимизированных решений, то участков, требующих вмешательства человека, может не быть вообще, и полная автоматизация вполне оправданна. Например, это воз-

можно при производстве и монтаже печатных плат или сварке кузовов легкового автомобиля.

Однако при изготовлении продукции малыми или единичными сериями и необходимости в быстрой сменяемости продуктовых линеек коллаборативный подход будет экономически оправдан. Кроме того, комбинирование вышеуказанных факторов с устойчивым дефицитом рабочих кадров, а также ухудшением ситуации с высококвалифицированными специалистами в связи с тяжелой демографической ситуацией делают КМАС одним из лучших технологических решений.

Место человека в коллаборативной мультиагентной системе

Одна из основных задач, возникающих при разработке промышленных КМАС, состоит в рациональном разделении функций человека и автоматизированной производственной системы.

В общем случае участие человека в производственном процессе оправданно при выполнении отдельных сложных операций, допускающих определенную вариативность действий и требующих осведомленности о состоянии других вовлеченных в выполнение операции процессов, например, при выполнении заклепочных операций при монтаже фюзеляжа летательных аппаратов на среднесерийном производстве, так как для подобного производства системы автоматизированной клепки не окупаются из-за высокой стоимости при малой серийности производства [4]. Примеры коллаборативных производств уже известны в электронной промышленности, где относительно дешевые роботы с достаточной точностью повторяемости операций выполняют простейшие подготовительные операции и облегчают человеку выполнение особо ответственных операций [5, 17]. При выполнении ответственных операций роботы могут ассистировать рабочему после обучения в режиме податливости приводов в звеньях манипулятора. Манипуляционные роботы подают, удерживают и ориентируют собираемые детали, выполняют технологические операции. Здесь примером могут служить операции нанесения герметиков на криволинейные поверхности.

На упомянутых производствах коллаборативные роботы функционируют в том же рабочем пространстве, что и человек. Это требует дополнительных решений в области обеспече-

ния безопасности человека в рабочем пространстве робота. Необходимо обеспечить безопасность и остального технологического оборудования в этом пространстве. Задача обеспечения отсутствия столкновения с роботом в настоящее время чаще всего решается путем организации силомоментного оцувствления приводов манипулятора, что позволяет автоматически остановить робот при неожиданном возрастании нагрузки, а также за счет тактильного оцувствления элементов конструкции роботов. Внедрение подобных систем требует анализа технологии производства и учета экономических факторов, связанных либо с усложнением средств автоматизации, либо с учетом привлечения высококвалифицированных рабочих.

Таким образом, первая проблема организации коллаборативного производства заключается в выделении тех участков технологического цикла, на которых целесообразно участие человека как исполнителя. Здесь возможны различные решения в зависимости от характера выполняемых операций. Например, в работе [6] рассматриваются пять вариантов взаимодействия ("коллаборации") человека с промышленным роботом (рис. 1, см. вторую сторону обложки).

Самый распространенный вид взаимодействия человека и промышленного робота — это функционирование в разделенном пространстве, где робот физически огражден от человека. По мере роста занимаемого человеком объема в пространстве функционирования робота повышаются требования к системам безопасности, включающие в себя системы обнаружения и мониторинга контакта робота с человеком [12, 17]. Чем выше уровень взаимодействия, тем выше потенциальная опасность для исполнителя. Это требует введения дополнительных устройств и программно-аппаратных решений для обеспечения безопасности. Заметим, что простая остановка манипулятора в случае опасности не всегда является оптимальным решением. Она нарушает нормальный ход технологической операции и увеличивает время ее выполнения, что может привести к сбою и других операций, связанных с ней в соответствии с алгоритмом технологического процесса в целом. Здесь нужны программные и аппаратные средства, контролирующие ход операции и при необходимости перепланирующие траекторию движения робота без его остановки, в том числе супервизорные системы.

При планировании коллаборативного технологического процесса необходимо учиты-

вать и объективные возможности самого человека — физические и когнитивные [13, 14]. Эти возможности суть ограничения, которые свойственны человеку в силу его биологической природы и не могут быть преодолены за счет обучения, тренировки. Отчасти они достаточно хорошо изучены и формализованы в эргономических стандартах техники. К ним относятся ограничения производственной деятельности человека различной природы, позволяющие избежать переутомления: физического — усталости; умственного — утомления от сложности решаемых задач или от монотонности работы; эмоционального — напряженности, связанной с ответственностью работы. Следствием утомления является увеличение вероятности ошибок, снижение качества выполнения операций и увеличение длительности их выполнения [10].

Таким образом, можно отметить, что деятельность человека в составе коллаборативной системы всегда включает две составляющие — предметную и когнитивную. К последней относятся такие области инженерной психологии, как оценка внимания, восприятия информации человеком, способов принятия решения и самоанализа результатов своей деятельности. Эргономики КМАС пока не существует, поскольку исследования особенностей работы человека в составе КС с инженерно-психологических позиций практически не проводились. Тем не менее, проектирование КМАС должно в полной мере учитывать, во всяком случае, те эргономические ограничения, которые достаточно хорошо изучены и сформулированы в виде эргономических рекомендаций и нормативов [7].

Оценка предметной составляющей производственной деятельности человека может проводиться с использованием технического зрения и специальной аппаратуры, регистрирующей такие показатели, как утомляемость, концентрация внимания, напряженность работы. Различные типы миодатчиков и пульсометров позволяют определить параметры физического состояния конкретного человека, косвенно определяющие степень физической усталости. Индикатором эргономических ограничений когнитивного характера является его психоэмоциональное состояние. Методы, использующие техническое зрение и машинное обучение для определения психоэмоционального состояния человека по мимике лица и позе, стали возможны в режиме реального времени [8]. Учитывая требуемую степень коллаборативности, напри-

мер по классификации согласно рис. 1 (см. вторую сторону обложки), возможно выдвигать требования и к необходимости оперативного анализа психоэмоционального состояния человека. В наиболее простом случае, когда задачи, выполняемые человеком, и задачи, выполняемые роботом, требуют только синхронизации этапов выполнения задач, можно ограничиться информацией о начале и конце выполнения задач. При взаимодействии более высокого уровня (рис. 1), потребуется синхронизация совместных действий человека и робота в реальном времени.

Проблемы формализации КМАС

Итак, основная особенность КМАС состоит в том, что ее элементами являются не только технические устройства — роботы, станки, технологическое оборудование, но и люди со свойственными им ограничениями. Это определяет особенности математического описания такой системы. Одним из вариантов математических аппаратов, описывающих состояния исполнительных элементов подобных систем и систему управления, может быть вариант в конечных автоматов и сетей и управляющих автоматов соответственно, а моделирование систем можно проводить, например, с помощью сетей Петри [18], вводя допущение об описании технологических операций человека как автомата с конечным числом состояний. Однако использование подобного математического аппарата при моделировании производства, в котором используются КМАС, возможно, если в конкретном технологическом процессе на тех участках, где участие человека целесообразно, задачи человеком и роботом выполняются последовательно, и этапы выполнения могут быть представлены дискретными состояниями человека и робота.

Для более сложных случаев (уровни кооперации и непосредственной коллаборации (рис. 1, см. вторую сторону обложки)) необходимо рассмотреть возможность использования иных подходов, включающих и модель деятельности человека в КМАС. Такая модель должна учитывать:

- значимые свойства конкретного исполнителя;
- особенности поведения оператора КМАС для заданного участка производства;
- допустимые с точки зрения технологии производства отклонения параметров этой модели;
- возможности обучения будущих операторов производства с использованием КМАС;

- требования к психофизиологическим характеристикам операторов КМАС.

Для определения возможности измерения состояний человека необходимо формализовать отношение человека с внешней средой, в контексте его функционирования как агента КМАС и субъекта сенсорно-информационной сети. Целенаправленное изменение конфигурации пространства или собственного положения человека в пространстве за фиксированный промежуток времени можно назвать действием, что не противоречит общепринятому определению деятельности как движения, выполняющего определенную цель [11].

Действие применительно к робототехнике — это элементарная операция (элементарное действие), например: взять объект, положить, захватить, сориентировать и т.п. Деятельностью назовем совокупность действий, направленных на решение общей задачи. Применительно к робототехнике деятельность — это сложная операция, например: обойти препятствие, захватить объект сложной формы, извлечь определенный объект из завала, обработать сложную поверхность.

В момент совершения действия человек обладает однозначным положением в пространстве и однозначной конфигурацией тела, находится на какой-то стадии завершения действия и реализации своей деятельности, обладает психоэмоциональным и физическим состоянием. Для оптимальности принимаемых решений о необходимости осуществления каких-либо действий в КМАС данные о состоянии человека в сенсорно-информационной сети должны как-то определяться.

Человек в составе КМАС может иметь информацию о работе "соседей", с которыми он связан в технологическом цикле. Если при этом допустить, что оператор может и общаться с ними (с операторами соседних коллаборативных ячеек), минуя центральный пост, на который, конечно, информация об этом общении передается, то термин "деятельность" представляется уже вполне оправданным применительно к участку, содержащему КМАС, т.е. к участку коллаборативного производства. Этот участок производства приобретает определенную самостоятельность и свойство самоорганизации, производство же в целом — структуру гибридного характера, сочетающую централизацию на уровне управления участками КМАС с децентрализацией на уровне отдельных участков производства. Производство

приобретает гибкость как в обычном смысле — при оперативном изменении условий производства, технических заданий, требований и т.п., так и в отношении людей, занятых на этом производстве в составе КМАС.

Отметим, что для производственного применения КМАС все рабочие места должны быть оборудованы дополнительной аппаратурой — датчиками, системами связи и предоставления информации, узлами адаптации и др. Эта аппаратура образует информационную сеть, наложенную на собственно рабочие места, коллаборативные ячейки, и обеспечивающую гибкость системы в указанном смысле. Магнитные и инфракрасные метки с использованием специальных камер позволяют определить положение человека в пространстве. Задача разделяется на несколько уровней:

- определение положения человека в поле функционирования КМАС;
- локализация положения человека относительно элементов КМАС;
- определение взаимного положения отдельных частей КМАС;
- планирование перемещений в рамках постановки задач;
- прогнозирование перемещений в рамках системы мониторинга и оптимизации процессов.

Обычно производство включает как роботизированные рабочие места, включая КМАС, так и обычные рабочие места. Поэтому концепцию гибкого в обоих смыслах производства можно обобщить и на обычное производство, которое включает КМАС. Тогда обычное рабочее место, например, токарный станок, за которым работает станочник, можно включить в информационно-аппаратную сеть, снабдив рабочее место дополнительной аппаратурой, регистрирующей все параметры изделий (заготовок), поступающих на "вход" и получаемых "на выходе", плюс параметры, характеризующие работу человека на данном оборудовании, прежде всего, время и качество продукции (рис. 2, см. вторую сторону обложки).

При этом и основной принцип коллаборативности — взаимная адаптация человека и технологического процесса — можно будет применить не только к КМАС, но и к любому автоматизированному производству, соблюдая отношения между элементами сенсорно-информационной сети КМАС, как показано на рис. 2. Основным элементом, обеспечивающим адаптивность робототехнических средств и

оптимальность принимаемых решений, является система искусственного интеллекта (ИИ) (рис. 2) в виде экспертной системы управления на базе алгоритмов машинного обучения. Возможно, это и есть современный путь к модернизации производства не только за счет автоматизации, роботизации — не устранение человека из производственного процесса, а взаимная адаптация человека и производственного процесса, повышающая не только качество продукции, но и качество труда.

Применение коллаборативных роботов, взаимодействующих с людьми и между собой, ставит задачу разработки новых систем управления группами роботов в рамках мультиагентной среды. Основные требования к элементам системы управления подобной системой представлены в работе [5]. Общая архитектура системы управления для групп роботов оказывает значительное влияние на надежность и масштабируемость системы. Архитектура системы управления группой роботов должна учитывать взаимодействие роботов, роботов и людей, тот факт, как поведение группы будет генерироваться на основе поведения отдельных роботов в команде, а решение общепроизводственных задач является сложной композицией из действий людей и роботов.

Известные архитектуры систем управления группами роботов — централизованные, иерархические, децентрализованные и гибридные — имеют реализации для детерминированных безлюдных сред [9, 12, 19, 20].

Для коллаборативных систем эффективность применения тех или иных способов управления требует дополнительного обоснования.

На наш взгляд, гибридные схемы управления являются наиболее эффективными в рамках КМАС. Гибридные архитектуры систем управления сочетают локальное тактическое управление со стратегическим высокоуровневым управлением, что позволяет внести дополнительный уровень безопасности, за счет принятия решений в реальном времени на локальном уровне с сохранением возможности при необходимости централизованно распределять ресурсы и назначать глобальные цели. Поскольку на производствах нет нужды в полной автономности, а коллаборативность при этом обуславливает недетерминированность среды, что ставит высокие требования к скорости реакции роботов, то речь идет о коллаборативной гибридной архитектуре системы управления [2]. Гибридные архитектуры яв-

ляются наиболее привлекательными для реализации системы управления мультиагентной сети коллаборативных роботов ввиду возможности реализации реактивных и проактивных моделей поведения агентов с учетом адаптивности к изменениям среды и реализации "когнитивных" свойств агентов при распределении задач и их реализации.

Условия промышленного производства позволяют реализовать дополнительный уровень контроля и управления в виде сенсорно-информационной сети. Сенсорно-информационная сеть позволит реализовать диспетчеризацию задач между коллаборативными роботами и людьми.

Сенсорно-информационная сеть состоит из главного управляющего узла сети, пассивных узлов и активных агентов и каналов обмена информацией между узлами (агентами) (рис. 3, см. третью сторону обложки).

Пассивные узлы отвечают только за предоставление информации — это устройства мониторинга взаимодействия агентов сети, мониторинга внутреннего состояния агентов сети и состояния внешней среды. Активные агенты совершают действия, направленные на решение производственных задач — это роботы и люди.

Заключение

В данной статье представлен новый подход к автоматизации, основанный на одновременном использовании труда людей и роботов в единой системе в рамках решения целевой задачи, — КМАС. В работе введены основные понятия и определения, рассмотрены основания для проведения исследований в области интеграции КМАС в производственные процессы и иные типы деятельности. Показано, что необходимость создания КМАС продиктована экономическими показателями как важнейшим фактором при разработке промышленных систем. Но не менее важным является тот факт, что появление и разработка таких систем открывает широкий пласт для научных исследований. Предложенный метод представления человека как агента КМАС требует дальнейшей разработки методов формализации динамики процессов, алгоритмов и программно-аппаратных средств для определения состояния человека, целеполагания и целераспределения, оценки качества, а также разработки сенсорно-информационной сети и алгоритмов управле-

ния, учитывающих функционирование в рамках системы агентов различной природы.

Список литературы

1. **Crisman Jill D.** Grand challenges for robotics and automation: The 1996 ICRA panel discussion // *IEEE Robotics Automat. Mag.* 1996. N. 3, 4. P. 10—16.
2. **Shereuzhev M., Serebrenny V.** Industrial collaborative multi-agent systems: main challenges // *Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings".* Springer, 2019.
3. **Ющенко А. С.** Коллаборативная робототехника: состояние и новые задачи // *Мехатроника, автоматизация, управление.* 2017. Т.18, № 12. С. 812—819.
4. **Serebrenny V. V. et al.** Technological Collaborative Robotic Systems // *AIP Conference proceedings.* 2019.
5. **Akella P. et al.** Cobots for the automobile assembly line // *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. ICRA.* 1999.
6. **Kolbeinsson A., Lagerstedt E., Lindblom J.** Classification of Collaboration Levels for Human-Robot Cooperation in Manufacturing // *Advances in Manufacturing Technology XXXII: OS Press,* 2018.
7. **Ющенко А. С.** Эргономические проблемы коллаборативной робототехники // *Робототехника и техническая кибернетика.* 2019. Т. 7, № 2.
8. **Yuschenko A. S., Konyshev D. V., Vorotnikov S. A., Zhonin A. A.** Mimic Recognition and Reproduction in Bilateral Human-Robot Speech Communication // *Springer, Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 9812. ICR-2016. P. 133-142.
9. **Назарова А. В., Рыжова Т. П.** Методы и алгоритмы мультиагентного управления робототехнической системой // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. "Приборостроение"*, 2012.
10. **Мунипов В. М., Зинченко В. П.** Эргономика: человеко-ориентированное проектирование техники, программных средств и среды. М.: Лотос, 2001.
11. **Ломов Б. Ф.** Методологические и теоретические проблемы психологии. М.: Наука, 1999. 163 с.
12. **Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г.** Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Физматлит, 2009.
13. **Islam Md Jahidul, Mo Jiawei, Sattar Junaed.** Robot-to-Robot Relative Pose Estimation using Humans as Markers, 2019, arXiv:1903.00820 [cs.RO].
14. **Ермакова Е. С.** Изучение диалектических структур мышления в психологии // *Вестник ЛГУ им. А. С. Пушкина.* 2010. Т. 2.
15. **Анохин П. К.** Философские аспекты теории функциональной системы. М.: Наука, 1978.
16. **Vorotnikov S., Ermishin K., Nazarova A., Yuschenko A.** Multi-agent robotic systems in collaborative robotics // *Lecture Notes in Computer Science.* 2018. Vol. 11097 LNAI. DOI: 10.1007/978-3-319-99582-3_28
17. **Peshkin M. A., Colgate J. E., Wannasuphoprasit W., Moore C. A., Gillespie R. B., Akella P.** Cobot architecture // *IEEE Transactions on Robotics and Automation.* 2001. Vol. 17, N. 4. P. 377—390. doi: 10.1109/70.954751.
18. **Figat M., Zieliński C.** Methodology of Designing Multi-agent Robot Control Systems Utilising Hierarchical Petri Nets // *International Conference on Robotics and Automation (ICRA).* 2019.
19. **Юревич Е. И.** О проблеме группового управления роботами // *Мехатроника, автоматизация, управление.* 2004. № 2. С. 9—13.
20. **Timofeev A. V.** Intelligent Control and Operations Research for Multi-Agent Robot Systems // *International Autonomous Systems: Intern. Scientific Issue. Karlsruhe-Ufa: USATU,* 1998. P. 119—124.

Collaborative Multiagent Systems — an Alternative to Full Automation of Production

V. V. Serebrenny, vsereb@bmstu.ru,

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

Corresponding author: Serebrenny V. V., PhD, Head of Department "Robotic Systems and Mechatronics",
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: vsereb@bmstu.ru

Accepted on February 25, 2020

Abstract

The paper proposes a new approach as an alternative to full automation of processes that meets current economic trends — collaborative multi-agent systems. In this concept, people and robots are considered as agents in a single sensory-information field, who perform tasks to achieve the goals of the collaborative multi-agent system. The urgency of collaborative multi-agent systems results from the fact that the industrial use of fully automated multicomponent systems is limited by the financial and infrastructural unavailability of various industries to switch to completely unmanned technologies. The proposed approach combines the latest, but remaining quite recouped, technological advances along with highly skilled human labor. The use of collaborative multi-agent systems will be economically justified in the manufacture of products in small batches, in the conditions of rapid change of product lines, as well as the presence of staff shortages. The article shows that such an approach can significantly reduce automation costs, while ensuring that the specified production indicators are met. This approach allows taking a fresh look at a human, considering him and a robot as equal partners within a collaborative system. The basic concepts and distinctive characteristics of collaborative multi-agent systems are formulated and presented in the work, justifications for their use are given. Creating a new class of collaborative multi-agent systems requires solving a number of problems associated with the interaction of man and robot. The article considers issues related to the work of a person within a collaborative system, with a rational separation of human functions and an automated production system, in accordance with the necessary level of collaboration. The inclusion of a person with his psychoemotional and physical characteristics as an equivalent agent of a multi-agent system causes difficulties in formalizing collaborative multi-agent systems associated with the need to take these features into account and create a sensory-information system. The inclusion of a person with his psychoemotional and physical characteristics as an equivalent agent of a multi-agent system causes difficulties in formalizing collaborative multi-agent systems associated with the need to take these features into account and create a sensory-information system. The paper discusses ways to formalize a collaborative multi-agent system and management approaches.

Keywords: automation of production, collaborative robotics, multi-agent control, sensor-information network

For citation:

Serebrenny V. V. Collaborative Multiagent Systems — an Alternative to Full Automation of Production, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 7, pp. 404—411.

DOI: 10.17587/mau.21.404-411

References

1. Crisman Jill D. Grand challenges for robotics and automation: The 1996 ICRA panel discussion, *IEEE Robotics Automat. Mag.*, 1996, no. 3, 4, pp. 10—16.
2. Shereuzhev M., Serebrenny V. Industrial collaborative multi-agent systems: main challenges, *Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*, Springer, 2019.
3. Yuschenko A. S. Collaborative robotics: state and new challenges, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 12, pp. 8—13 (in Russian).
4. Serebrenny V. V. et al. Technological Collaborative Robotic Systems, *AIP Conference proceedings*, 2019.
5. Akella P. et al. Cobots for the automobile assembly line, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA*, 1999.
6. Kolbeinsson A., Lagerstedt E., Lindblom J. Classification of Collaboration Levels for Human-Robot Cooperation in Manufacturing, *Advances in Manufacturing Technology XXXII*, OS Press, 2018.
7. Yuschenko A. S. Ergonomic problems of collaborative robotics, *Robotics and technical cybernetics*, 2019, vol. 7, no. 2 (in Russian).
8. Yuschenko A. S., Konyshov D. V., Vorotnikov S. A., Zhonin A. A. Mimic Recognition and Reproduction in Bilateral Human-Robot Speech Communication, Springer, Lecture Notes in Artificial Intelligence, 9812, ICR-2016, pp. 133—142.
9. Nazarova A. V., Ryzhova T. P. Methods and algorithms for multi-agent control of a robotic system, *Bulletin of Bauman MSTU*, 2012 (in Russian).
10. Munipov V. M., Zinchenko V. P. Ergonomics: Human-Oriented Engineering, Software, and Environment Design, Lotos, Moscow, 2001 (in Russian).
11. Lomov B. F. Methodological and theoretical problems of psychology, Moscow, Nauka, 1999, c.163 (in Russian).
12. Kaliev I. A., Gayduk A. R., Kapustian S. G. Models and algorithms of collective control in groups of robots, Moscow, Fizmatlit, 2009 (in Russian).
13. Islam Md Jahidul, Mo Jiawei, Sattar Junaed. Robot-to-Robot Relative Pose Estimation using Humans as Markers, 2019, arXiv:1903.00820 [cs.RO].
14. Ermakova E. S. The study of the dialectical structures of thinking in psychology, *Bulletin of Leningrad State University named after A. S. Pushkin*, vol. 2, 2010 (in Russian).
15. Anokhin P. K. Philosophical aspects of the theory of a functional system. Nauka, Moscow, 1978 (in Russian).
16. Vorotnikov S., Ermishin K., Nazarova A., Yuschenko A. Multi-agent robotic systems in collaborative robotics, *Lecture Notes in Computer Science*, 2018, vol. 11097 LNAI, DOI: 10.1007/978-3-319-99582-3_28.
17. Peshkin M. A., Colgate J. E., Wannasupphakit W., Moore C. A., Gillespie R. B., Akella P. Cobot architecture, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2001, vol. 17, no. 4, pp. 377—390, doi: 10.1109/70.954751.
18. Figat M., Zieliński C. Methodology of Designing Multi-agent Robot Control Systems Utilising Hierarchical Petri Nets, *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2019.
19. Yurevich E. I. About the problem of group control of robots, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2004, no. 2, pp. 9—13 (in Russian).
20. Timofeev A. V. Intelligent Control and Operations Research for Multi-Agent Robot Systems, *International Autonomous Systems: Intern. Scientific Issue*, Karlsruhe-Ufa, USATU, 1998, pp. 119—124.

Y. I. Myshlyaev, C. Sc, uimysh@mail.ru, **A. V. Finoshin**, C. Sc, earlov@gmail.com,
Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Russian Federation
Nguyen Chi Thanh, C. Sc, nct1101@gmail.com,
Technical University Le Quy Don, 236 Hoang Quoc Viet, Hanoi, Vietnam

*Corresponding author: Myshlyaev Yury I., C. Sc, Bauman Moscow State Technical University,
Kaluga Branch, Kaluga, Russian Federation, e-mail: uimysh@mail.ru*

Accepted on March 27, 2020

Energy-Based Adaptive Oscillation Control of the Electromechanical Systems

Abstract

The swing-up control of the electromechanical systems is considered. Electromechanical system is the cascade system. The input subsystem is a mechanical plant. The output subsystem is the actuator which dynamics cannot be neglected in particular oscillation control problem. The energy-based objective function is used to design the energy efficient virtual control law of output subsystem. The control objectives are achieving the mechanical subsystem's reference energy and boundedness of closed-loop cascade system trajectories. In parametric uncertainty, both energy and the control objective depends on unknown parameters of a mechanical subsystem. That complicates the design procedure. The modified Speed bi-gradient method (SBGM) to identify unknown parameters, achieve a desired energy and provide boundedness of the trajectories is proposed. Modifications of SBGM are the introduction of the output subsystem tunable model, and indirect adaptive control design. Swing-up control is calculated based on current estimation performed by the adaptation loop that is without preliminary identification. The design procedure, conditions of applicability and stability analysis are presented. The proposed method is used to design the swing-up control of pendulum under parametric uncertainty. The experimental results confirming the performance of a closed-loop system are demonstrated.

Keywords: speed-gradient method, speed-bigradient method, adaptive control, sliding mode control, Hamiltonian systems, stability, Lyapunov function

For citation:

Myshlyaev Y. I., Finoshin A. V., Nguyen Chi Thanh. Energy-Based Adaptive Oscillation Control of the Electromechanical Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 7, pp. 412—419.

DOI: 10.17587/mau.21.412-419

УДК 681.511.4

DOI: 10.17587/mau.21.412-419

Ю. И. Мышляев, канд. техн. наук, uimysh@mail.ru, **А. В. Финошин**, канд. техн. наук, earlov@gmail.com,
КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана, Калуга, Россия,
Нгуен Ти Тхань, nct1101@gmail.com
КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана, Калуга, Россия

Адаптивное управление свободными колебаниями электромеханических систем

Рассматривается задача управления колебаниями электромеханических систем. При синтезе учитывается каскадный характер системы. Входным каскадом является механическая подсистема, выходным — привод, динамика которого оказывает существенное влияние на качество управления. Использование энергетической целевой функции позволяет синтезировать энергетически эффективные алгоритмы виртуального управления выходным каскадом. Целью управления является достижение заданного уровня энергии механической подсистемой и ограниченность

траекторий замкнутой системы. Наибольшую сложность вызывает управление колебаниями в условиях параметрической неопределенности, т.к. в этом случае энергия системы и, как следствие, целевая функция зависят от неизвестных параметров. Предлагается модификация метода скоростного биградиента путем введения настраиваемой модели выходного каскада и синтеза непрямого адаптивного управления. Получаемые в процессе адаптации оценки параметров используются для формирования управления без предварительной идентификации. Описывается методика синтеза, условия применимости алгоритмов и обосновывается достижение цели управления. Предлагаемая методика используется для синтеза алгоритма управления маятником с учетом динамики привода. Приводятся результаты стендовых испытаний, демонстрирующие достижение заданных характеристик колебаний и точность идентификации параметров.

Ключевые слова: метод скоростного градиента, метод бискоростного градиента, адаптивное управление, скользящие режимы, гамильтоновы системы, устойчивость, функция Ляпунова

Introduction

Control of nonlinear oscillatory systems problem arises in mechanics, optics, and other fields. Energy-based control design approach is based on specifying the desired plant energy level instead of trajectory. Speed-gradient (SG) method is used to design swing-up control law with energy objective function [1]. It ensures the control goal is achieved with arbitrary small control action. The energy-based design approach successfully applied for stabilization of unstable equilibrium of various pendulum systems, such as two-link pendulum (M. W. Spong [2]), reaction wheel pendulum (Andrievskiy B. R [3], M. W. Spong [4], Bobtsov A. A. [5]), cart-poly system (S. C. Peters [6]) etc. [7–9].

In the oscillation control, the drive motor dynamics usually has significant influence on control performance. Then problem is formulated as swing-up control of the cascade system consisting a mechanical subsystem and a drive motor. The control objectives are achieving the mechanical subsystem reference energy and boundedness of closed-loop cascade system trajectories, that is the partial stability problem.

Energy-based control in the parametric uncertainties is awkward because of both an energy and a control objective accordingly depend on unknown parameters of a mechanical subsystem. Adaptive swing-up control of nonlinear cascade system is proposed by D. Efimov [10]. Unlike SBGM, D. Efimov relies on backstepping method to design the closed-loop control law. It requires to calculate the virtual control derivative. The adaptive filter is used for adaptation of unknown parameters. Wherein the closed-loop system dimension increases significantly.

The Sliding mode with tuning surface (SMTS) method proposed by Myshlyayev is used to control the cascade nonlinear systems in the parametric uncertainties [11]. The method combines output subsystem's parameters adaptation, tuned virtual control of output subsystem, and sliding mode con-

trol depending on tuned parameters. Later, SMTS method was extended by smooth control law with tuned surface, and was named speed bi-gradient method (SBGM) [12].

The generalization of SBGM for control objective depending on unknown parameters [13] is considered. Modifications of SBGM are the introduction of the output subsystem tunable model, and indirect adaptive control design. The proposed design approach ensures both the achievement the desired energy, and the boundedness of system trajectories in uncertainties.

The problem formulation of adaptive swing-up control of cascade systems is given in Section 1. In Section 2, SBGM for objective function depending on unknown parameters is described. Conditions of applicability and theorems justifying the achievement of control objective are presented. In Section 3, the proposed method is applied to design swing-up control of the pendulum with an actuator. The experimental results confirming the performance of a closed-loop system are demonstrated.

Problem formulation

Consider the affine cascade plant consisting of output subsystems S_1 that is described in hamiltonian form (1) for convenience, and input subsystems S_2 that is an actuator (2)

$$S_1: \dot{q}_i = \frac{\partial H(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \xi)}{\partial p_i}, \quad \dot{p}_i = -\frac{\partial H(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \xi)}{\partial q_i}, \quad (1)$$

$$i = 1, \dots, h, \quad h = (n - m)/2;$$

$$S_2: \dot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{u}, \quad (2)$$

where $\mathbf{x}_1 = \text{col}\{\mathbf{q}, \mathbf{p}\} \in \mathbb{R}^{n-m}$, $\mathbf{x}_2 \in \mathbb{R}^m$ is generalized force, $\mathbf{q} = \text{col}\{q_1, \dots, q_h\}$, $\mathbf{p} = \text{col}\{p_1, \dots, p_h\}$ are generalized coordinates and momenta, $\xi \in \Xi$ is a vector of unknown parameters, $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$ is control,

$H(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \xi) = H_0(\mathbf{x}_1, \xi) + \mathbf{H}_1(\mathbf{x}_1, \xi)^T \mathbf{x}_2$ is hamiltonian function, $H_0(\mathbf{x}_1, \xi)$ is the internal hamiltonian describing unforced motion of the output subsystem, $\mathbf{H}_1(\mathbf{x}_1, \xi)$ is the vector of interaction hamiltonians.

Assumption 1. The terms of hamiltonian function that are $H_0(\mathbf{x}_1, \xi)$, $\mathbf{H}_1(\mathbf{x}_1, \xi)$ can be decomposed as $H_0(\mathbf{x}_1, \xi) = \xi^T \mathbf{H}_0(\mathbf{x}_1)$ and $\mathbf{H}_1(\mathbf{x}_1, \xi) = \xi^T \mathbf{H}_1(\mathbf{x}_1)$, where $\mathbf{H}_0(\mathbf{x}_1)$, $\mathbf{H}_1(\mathbf{x}_1)$ are sensor matrices.

In many applications, it is possible to transform the plant parameters to new ones ξ so that Assumption 1 is valid.

Control objective is to design an adaptive control law $\mathbf{u}$ ensuring both the boundedness of system trajectories, and achievement the desired energy H_* by a output subsystem.

Control design method

Introduce the objective function

$$Q(\mathbf{x}_1, \xi) = 0,5(H_0(\mathbf{x}_1, \xi) - H_*)^2, \quad (3)$$

and formalize the control objective

$$Q(\mathbf{x}_1, \xi) \leq \Delta_{x_1} \text{ for } t \geq t_*. \quad (4)$$

where t_* is time to achieve control objective with the specified accuracy $\Delta_{x_1} > 0$.

Assumption 2. The first and the second partial derivatives of $H_0(\mathbf{x}_1, \xi)$, and $\mathbf{H}_1(\mathbf{x}_1, \xi)$ on $\mathbf{x}_1$ are bounded on set $\Omega_0 = \{\mathbf{x}_1 : Q(\mathbf{x}_1, \xi) \leq \Delta_{x_1}\}$ for some $\Delta_{x_1} > 0$ and $\forall \xi \in \Xi$.

An objective function (3) depend on unknown parameters. Then SBGM can't be directly applied. Consider the modification of SBGM by introducing the tunable model of an output subsystem to identify unknown parameters.

Divide the initial problem on two independent subtasks that are

1. design control law $\mathbf{u}^*$ of a cascade system (1), (2) assuming that plant's parameters are known;
2. design adaptation loop to identify output subsystem's parameters.

Closed-loop control law depends on tuned estimations of parameters and doesn't require preliminary identification.

Consider subtasks in details. Introduce the deviation from the tuned intersection of the manifolds $\sigma \equiv \mathbf{0}$ as

$$\sigma = \mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_{2\text{virt}}, \quad (5)$$

where $\mathbf{x}_{2\text{virt}}$ is the virtual control of output subsystem.

Subtask 1. Stage 1.1. Introduce the "ideal" deviation from the intersection of the manifolds σ^* assuming that plant's parameters are known.

$$\sigma^* = \mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_{2\text{virt}}^*. \quad (6)$$

Design the "ideal" virtual control $\mathbf{x}_{2\text{virt}}^* = \mathbf{x}_{2\text{virt}}^*(\mathbf{x}_1, \xi)$ of output subsystem as SG in the finite form

$$\mathbf{x}_{2\text{virt}}(\mathbf{x}_1, \xi) = -\gamma_x \nabla_{\mathbf{x}_{2\text{virt}}}^* w(\mathbf{x}_1, \xi, \sigma^*) \quad (7)$$

where $\gamma_x > 0$, $w(\mathbf{x}_1, \xi, \sigma^*) = \dot{Q}(\mathbf{x}_1, \xi) = (H_0 - H_*) \times [H_0, \mathbf{H}_1]^T (\mathbf{x}_{2\text{virt}}^* + \sigma^*)$, $[H_0, \mathbf{H}_1]$ is the Poisson bracket.

It is proven by A. Fradkov [1], an "ideal" virtual control law (7) is bounded for any bounded initial conditions, and it ensures the inequality

$$w(\mathbf{x}_1, \xi, \mathbf{0}) = -\gamma_x (H_0 - H_*)^2 \|[H_0, \mathbf{H}_1]^T\|^2 \leq -\rho_Q(Q) \quad (8)$$

holds true almost everywhere, where $\rho_Q(Q)$ is a scalar continuous strictly growing function such as $\rho_Q(Q) > 0$, and $\rho_Q(0) = 0$.

Stage 1.2. Design "ideal" control law $\mathbf{u}^*$, ensuring the achievement a "ideal" intersection of the manifolds $\sigma^* \equiv \mathbf{0}$. Introduce the additional control objective as

$$R(\sigma^*) \leq \Delta_\sigma \text{ for } t \geq \tilde{t}_*, \quad (9)$$

where

$$R(\sigma^*) = 0,5\sigma^{*T}\sigma^*, \quad (10)$$

$\tilde{t}_*$ is time to achieve additional control objective with the specified accuracy $\Delta_\sigma > 0$.

Calculate the speed of change of the deviation of the trajectory of control system from the intersection of the manifolds $\sigma^* \equiv \mathbf{0}$:

$$\dot{\sigma}^* = \mathbf{u}^* - \dot{\mathbf{x}}_{2\text{virt}}^*. \quad (11)$$

Control law ensuring the achievement of an additional control objective (9) is selected as SG algorithm in the finite form.

$$\mathbf{u}^* = -\gamma_m \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, \sigma^*), \quad (12)$$

where the vector-function $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, \sigma^*)$ satisfies the pseudogradient condition $\boldsymbol{\varphi}^T(\mathbf{x}, \sigma^*) \nabla_{\mathbf{u}} \mu(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \xi, \sigma^*, \mathbf{u}^*) \geq 0$, where $\mu(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \xi, \sigma^*, \mathbf{u}^*) = \sigma^{*T} \dot{\sigma}^*$ is the speed of change of (10) along the trajectories of (11). The

typical forms of vector-function are either linear or relay that are

$$\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\sigma}^*) = \nabla_{\mathbf{u}^*} \mu(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\sigma}^*, \mathbf{u}^*) = \boldsymbol{\sigma}^*, \quad (13)$$

$$\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\sigma}^*) = \text{sign} \nabla_{\mathbf{u}^*} \mu(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\sigma}^*, \mathbf{u}^*) = \text{sign} \boldsymbol{\sigma}^*. \quad (14)$$

Theorem 1. Consider the closed-loop system consisting of a plant (1), (2) assuming parameters are known, "ideal" virtual control (7), and "ideal" control (6), (12). Assume the $\dot{\mathbf{x}}_{2\text{virt}}^*$ is locally bounded on its arguments. Then all of the trajectories are bounded, both the main (4) and additional (9) control objectives are achieved. There exists Lyapunov function for closed-loop system

$$V = Q(\mathbf{x}_1, \boldsymbol{\xi}) + R(\boldsymbol{\sigma}^*). \quad (15)$$

Proof of theorem 1.

Calculate the speed of change of Lyapunov function candidate (15) along the trajectory of system (1), (2), (6), (7), (12)

$$\begin{aligned} \dot{V} &= (H_0 - H_*)[H_0, \mathbf{H}_1]^T (\mathbf{x}_{2\text{virt}}^* + \boldsymbol{\sigma}^*) + \\ &\quad + \boldsymbol{\sigma}^{*T} (\mathbf{u}^* - \dot{\mathbf{x}}_{2\text{virt}}^*) = \\ &= w(\mathbf{x}_1, \boldsymbol{\xi}, \mathbf{0}) + \boldsymbol{\sigma}^{*T} \boldsymbol{\eta}(\mathbf{x}_1) - \gamma_m \boldsymbol{\sigma}^{*T} \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\sigma}^*), \end{aligned} \quad (16)$$

where $\boldsymbol{\eta}(\mathbf{x}_1) = (H_0 - H_*)[H_0, \mathbf{H}_1] - \dot{\mathbf{x}}_{2\text{virt}}^*$.

Consider two cases.

Case 1. Let $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\sigma}^*) = \text{sign} \boldsymbol{\sigma}^*$ that is (14). Substitute (14) to (16) $\dot{V} = w(\mathbf{x}_1, \boldsymbol{\xi}, \mathbf{0}) + \boldsymbol{\sigma}^{*T} \boldsymbol{\eta}(\mathbf{x}_1) - \gamma_m \|\boldsymbol{\sigma}^*\|$. Then for $\gamma_m = \|\boldsymbol{\eta}\| + \gamma_0$, $\gamma_0 > 0$

$$\dot{V} \leq w(\mathbf{x}_1, \boldsymbol{\xi}, \mathbf{0}) - \gamma_0 \|\boldsymbol{\sigma}^*\| < 0. \quad (17)$$

From (17), it follows, the both deviation $H_0(\mathbf{x}_1, \boldsymbol{\xi}) - H_*$ and $\boldsymbol{\sigma}^*$ are bounded.

Consider problem of a convergence to the manifold in detail. From $\dot{R}(\boldsymbol{\sigma}^*) = -\gamma_m \|\boldsymbol{\sigma}^*\| - \boldsymbol{\sigma}^{*T} \dot{\mathbf{x}}_{2\text{virt}}^*$, where $\gamma_m = \|\dot{\mathbf{x}}_{2\text{virt}}^*\| + \gamma_0$, $\gamma_0 > 0$, and $\|\boldsymbol{\sigma}^*\| = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{R}$, it follows

$$\dot{R} \leq -\frac{\gamma_0}{\sqrt{2}} \sqrt{R}. \quad (18)$$

From (18), receive $\int_0^t \frac{dR}{\sqrt{R}} < -\frac{\gamma_0}{\sqrt{2}} \int_0^t d\tau$. Consequently $\sqrt{R(t)} < \sqrt{R(0)} - \frac{\gamma_0 \sqrt{2}}{4}$.

Since $R(t) \geq 0$, and right side of the inequality is a linear decreasing function, there exists $\tilde{t}_*$, such

that $R(t) = 0$ for $t > \tilde{t}_*$, then $\boldsymbol{\sigma}(t) \equiv \mathbf{0}$ for $t \geq \tilde{t}_*$. Thereby control objective (9) is achieved in finite time $\tilde{t}_*$.

Then for $t \geq \tilde{t}_*$, from (16) and considering (8), it follows

$$\dot{V} \leq w \leq -\rho_Q(Q). \quad (19)$$

From (19), according LaSalle's invariance principle, system trajectories converge either to invariant set $\Sigma_1 = \{\mathbf{x}_1 : H_0(\mathbf{x}_1, \boldsymbol{\xi}) - H_* = 0\}$, that is control objective (4) is achieved, or to set $\Sigma_2 = \{\mathbf{x}_1 : [H_0, \mathbf{H}_1] = 0\}$, that are equilibria of the control plant (1) [1, 14, 15]. The set of initial conditions which trajectories goes to equilibria for has Lebesgue measure zero.

Case 2. Let $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\sigma}^*) = \boldsymbol{\sigma}^*$ that is (13). Then from (16) it follows

$$\begin{aligned} \dot{V} &= w(\mathbf{x}_1, \boldsymbol{\xi}, \mathbf{0}) + \boldsymbol{\sigma}^{*T} \boldsymbol{\eta}(\mathbf{x}_1) - \gamma_m \boldsymbol{\sigma}^{*T} \boldsymbol{\sigma}^* \leq \\ &\leq w(\mathbf{x}_1, \boldsymbol{\xi}, \mathbf{0}) + \|\boldsymbol{\sigma}^*\| \|\boldsymbol{\eta}(\mathbf{x}_1)\| - \gamma_m \|\boldsymbol{\sigma}^*\|^2. \end{aligned} \quad (20)$$

From (20), for $\gamma_m \geq \frac{\|\boldsymbol{\eta}(\mathbf{x}_1)\|}{\|\boldsymbol{\sigma}^*\|} + \gamma_0$, $\gamma_0 > 0$, inequality (17) is satisfied. Hence both $\boldsymbol{\sigma}^*$ and $H_0(\mathbf{x}_1, \boldsymbol{\xi}) - H_*$ are bounded.

Recall (20). Maximize on $\|\boldsymbol{\sigma}^*\|$ the last two terms: $\|\boldsymbol{\eta}(\mathbf{x}_1)\| - 2\gamma_m \|\boldsymbol{\sigma}^*\| = 0$, $\|\boldsymbol{\sigma}^*\|_{\max} = \|\boldsymbol{\eta}(\mathbf{x}_1)\| / 2\gamma_m$. Substitute $\|\boldsymbol{\sigma}^*\|_{\max}$ to (20) to receive the maximum in the right side of the inequality

$$\dot{V} \leq w(\mathbf{x}_1, \boldsymbol{\xi}, \mathbf{0}) + \frac{\|\boldsymbol{\eta}(\mathbf{x}_1)\|^2}{4\gamma_m}. \quad (21)$$

From (21) it follows, for any $\Delta = \rho_Q(Q) > 0$ and $\varepsilon > 0$, there exists γ_m , so that $\frac{\|\boldsymbol{\eta}(\mathbf{x}_1)\|^2}{4\gamma_m} = \Delta - \varepsilon$ which implies $\dot{V} \leq -\varepsilon$.

From (21) and using LaSalle's invariance principle, system trajectories converge to the set $\left\{ \mathbf{x}_1 : w(\mathbf{x}_1, \boldsymbol{\xi}, \mathbf{0}) + \frac{\|\boldsymbol{\eta}(\mathbf{x}_1)\|^2}{4\gamma_m} = 0 \right\}$.

To proof that system trajectories converge to invariant set $\Sigma_1 \cup \Sigma_2 = \{\mathbf{x}_1 : H_0(\mathbf{x}_1, \boldsymbol{\xi}) - H_* = 0$ or $[H_0, \mathbf{H}_1] = 0\}$, take into consideration the assumption 2. The boundedness of second partial derivatives of $H_0(\mathbf{x}_1, \boldsymbol{\xi})$, and $\mathbf{H}_1(\mathbf{x}_1, \boldsymbol{\xi})$ implies the boundedness of $\dot{w}(\mathbf{x}_1, \boldsymbol{\xi}, \mathbf{0})$ and the boundedness $\dot{\mathbf{x}}_{2\text{virt}}^*$ accordingly. The control law $\mathbf{u}^*$ is bounded because of $\boldsymbol{\sigma}^*$ is bounded. Since the right side of (11) is bounded then $\dot{\boldsymbol{\sigma}}^*$ is also bounded. Consequently $\dot{V}$ is also bounded which implies $\dot{V}$ is uniformly continuous. With the Barbalat's lemma $\boldsymbol{\sigma}^* \rightarrow \mathbf{0}$

as $t \rightarrow \infty$, and system trajectories converge either to invariant set $\Sigma_1 = \{\mathbf{x}_1 : H_0(\mathbf{x}_1, \xi) - H_* = 0\}$, that is control objective (4) is achieved, or to set $\Sigma_2 = \{\mathbf{x}_1 : [H_0, \mathbf{H}_1] = 0\}$, that are equilibria of the control plant (1).

End of theorem 1 proof.

Subtask 2. Consider the output subsystem (1) in parametric uncertainties. Design the indirect adaptation law for bounded input $\mathbf{x}_2$. Introduce the additional control objective that is the plant's parameters identification

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{\xi} = \xi, \quad (22)$$

where $\hat{\xi}$ is the vector of tunable parameters.

Introduce the tunable model of output subsystem

$$\dot{\mathbf{x}}_{1*} = \mathbf{v}, \quad (23)$$

where $\mathbf{x}_{1*} \in \mathbb{R}^{n-m}$, $\mathbf{v} = \mathbf{v}(\mathbf{x}_1, \mathbf{e}, \mathbf{x}_2, \hat{\xi})$ is the input of a tunable model to be designed, $\mathbf{e} = \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_{1*}$.

Introduce the additional control objective with respect to design of a input $\mathbf{v}$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Q_e(\mathbf{e}) \rightarrow 0 \text{ при } t \rightarrow \infty, \quad (24)$$

where local objective function

$$Q_e(\mathbf{e}) = 0, 5\mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{e}, \quad \mathbf{P} = \mathbf{P}^T > 0. \quad (25)$$

Note, the control function (25) doesn't depend on unknown parameters. Apply two stages of SBGM to design adaptation law.

Stage 2.1. Design the "ideal" input $\mathbf{v}^* = \mathbf{v}(\mathbf{x}_1, \mathbf{e}, \mathbf{x}_2, \xi)$ of tunable model (23) to achieve the control objective (24) assuming output system's parameters are known. Consider the error dynamics

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}} &= \dot{\mathbf{x}}_1 - \dot{\mathbf{x}}_{1*} = \\ &= \text{col} \left\{ \frac{\partial H(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \xi, \mathbf{x}_2)}{\partial p_i}, -\frac{\partial H(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \xi, \mathbf{x}_2)}{\partial q_i} \right\} - \mathbf{v}. \end{aligned} \quad (26)$$

Select $\mathbf{v}^*$ as

$$\begin{aligned} \mathbf{v}^* &= \mathbf{v}(\mathbf{x}_1, \mathbf{e}, \mathbf{x}_2, \xi) = \\ &= \text{col} \left\{ \frac{\partial H(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \xi, \mathbf{x}_2)}{\partial p_i}, -\frac{\partial H(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \xi, \mathbf{x}_2)}{\partial q_i} \right\} - \mathbf{A}_* \mathbf{e} \end{aligned} \quad (27)$$

where $\mathbf{A}_*$ is $(n-m) \times (n-m)$ Hurwitz matrix.

"Ideal" input (27) ensures achievement of additional control objective (24)

$$\dot{Q}_e = \mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{A}_* \mathbf{e} < -\rho_e Q_e,$$

where $\rho_e = \lambda_{\min}(\mathbf{G})/\lambda_{\max}(\mathbf{P}) > 0$, $\lambda(\cdot)$ is eigenvalue, $\mathbf{P} = \mathbf{P}^T > 0$, and $\mathbf{G} = \mathbf{G}^T > 0$ satisfy the Lyapunov equation $\mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} = -\mathbf{G}$.

Stage 2.2. Replace the unknown parameters ξ by tuned ones $\hat{\xi}$ in (27)

$$\begin{aligned} \mathbf{v}(\mathbf{x}_1, \mathbf{e}, \mathbf{x}_2, \hat{\xi}) &= \\ &= \text{col} \left\{ \frac{\partial H(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \hat{\xi}, \mathbf{x}_2)}{\partial p_i}, -\frac{\partial H(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \hat{\xi}, \mathbf{x}_2)}{\partial q_i} \right\} - \mathbf{A}_* \mathbf{e}. \end{aligned} \quad (28)$$

Design an adaptation loop by SG algorithm in differential form

$$\dot{\hat{\xi}} = -\Gamma \nabla_{\hat{\xi}} \dot{Q}_e, \quad (29)$$

or

$$\dot{\hat{\xi}} = \Gamma \nabla_{\hat{\xi}} \text{col} \left(\frac{\partial H(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \hat{\xi}, \mathbf{x}_2)}{\partial p_i}, -\frac{\partial H(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \hat{\xi}, \mathbf{x}_2)}{\partial q_i} \right) \mathbf{P} \mathbf{e}, \quad (30)$$

where $\Gamma = \text{diag}\{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_l\} > 0$ is $(l \times l)$ matrix, l is number of tuned parameters.

Theorem 2. Consider the system consisting of output subsystem S_1 (1) with bounded input $\mathbf{x}_2$, tunable model (23) with input (28) and adaptation loop (30). Additional control objectives (22) and (24) are achieved. There exists Lyapunov function $V_2 = Q_e + \|\hat{\xi} - \xi\|_{\Gamma^{-1}}$.

Proof of theorem 2.

Consider the speed of change of V_2 along the trajectory of the closed-loop system (1), (13), (23) (26), (28), (30):

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \mathbf{e}^T \mathbf{P} \left(\text{col} \left\{ \frac{\partial H(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \xi, \mathbf{x}_2)}{\partial p_i}, -\frac{\partial H(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \xi, \mathbf{x}_2)}{\partial q_i} \right\} - \right. \\ &\quad \left. - \text{col} \left\{ \frac{\partial H(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \hat{\xi}, \mathbf{x}_2)}{\partial p_i}, -\frac{\partial H(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \hat{\xi}, \mathbf{x}_2)}{\partial q_i} \right\} + \mathbf{A}_* \mathbf{e} \right) + \\ &\quad + \dot{\hat{\xi}}^T \Gamma^{-1} (\hat{\xi} - \xi_*) = \mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{A}_* \mathbf{e} + \left(-\mathbf{e}^T \mathbf{P} \nabla_{\hat{\xi}}^T \times \right. \\ &\quad \times \text{col} \left\{ \frac{\partial H(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \hat{\xi}, \mathbf{x}_2)}{\partial p_i}, -\frac{\partial H(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \hat{\xi}, \mathbf{x}_2)}{\partial q_i} \right\} + \\ &\quad \left. + \dot{\hat{\xi}}^T \Gamma^{-1} \right) (\hat{\xi} - \xi). \end{aligned}$$

Taking (30) into account $\dot{V}_2 \leq \mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{A}_* \mathbf{e} \leq -\rho_e Q_e$. Consequently, all of the system (26), (28), (30) trajectories are bounded.

From (28) and boundedness of $\mathbf{e}$ and $\mathbf{x}_2$ taking into account, it follows the input $\mathbf{v}(\mathbf{x}_1, \mathbf{e}, \mathbf{x}_2, \hat{\xi})$ is bounded. Then $\dot{\mathbf{e}}$ is bounded because of (26),

boundedness of $\mathbf{v}(\mathbf{x}_1, \mathbf{e}, \mathbf{x}_2, \hat{\xi})$ and assumption 2. Consequently $\dot{V}_2 \leq 2\mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{A}^* \mathbf{e}$ is bounded which implies that $\dot{V}_2$ is uniformly continuous. With the Barbalat's lemma $\dot{V}_2 \rightarrow 0$, as $t \rightarrow \infty$, hence $\mathbf{e} \rightarrow 0$, $t \rightarrow \infty$, that is control objective (24) is achieved.

The boundedness of output subsystem's (1) trajectories follows from assumption 2. The boundedness of the tunable model's (23) trajectories follows from $\mathbf{x}_{1*} = \mathbf{x}_1 - \mathbf{e}$.

If vector-function

$$\Phi = \nabla_{\xi} \text{col} \left\{ \frac{\partial H(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \hat{\xi}, \mathbf{x}_2)}{\partial p_i}, -\frac{\partial H(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \hat{\xi}, \mathbf{x}_2)}{\partial q_i} \right\}$$

is persistently exciting the additional control objective (22) is achieved.

End of theorem 2 proof.

Note 1. The dimensions of tunable model (23) can be reduced, if unknown parameters are included only in part of equations of output subsystem (1).

Stage 3. Combine results of subtasks 1 and 2. Consider system (1)-(2) in parametric uncertainties with an adaptation law (30). Estimations of parameters calculated by an adaptation law are used in virtual control in form (7)

$$\mathbf{x}_{2\text{virt}}(\mathbf{x}_1, \hat{\xi}) = -\gamma_x \nabla_{\mathbf{x}_{2\text{virt}}} w(\mathbf{x}_1, \hat{\xi}, \sigma), \quad (31)$$

and accordingly both in the deviation from the tuned intersection of the manifolds (5), and in control law (12)

$$\mathbf{u} = -\gamma_m \Phi(\mathbf{x}, \sigma). \quad (32)$$

Control law (32) ensures the achievement of the additional control objective in form (9)

$$R(\sigma) \leq \Delta_\sigma \text{ for } t \geq \tilde{t}_*, \quad (33)$$

with objective function in form (10)

$$R(\sigma) = 0,5\sigma^T \sigma. \quad (34)$$

Virtual control (31) is locally bounded.

Statement 1. Consider the closed-loop system (see Fig. 1) consisting of control plant (1), (2), tunable model (23) with input (28), adaptation loop (30), virtual control law (31), control law (5), (32). Then all of the trajectories are bounded, and control objectives (4), (22), (24) and (33) are achieved. The boundedness of $\mathbf{x}_2$ follows from boundedness of $\mathbf{x}_{2\text{virt}}$ and σ .

Proposed method successfully applied for adaptive swing-up control and stabilization of unstable equilibria of the cart-pole system. [16]

Example

Consider the dynamics of the pendulum with dissipative torque:

$$S_1 : \begin{cases} \dot{q} = p, \\ \dot{p} = -\xi_1 \sin q - \xi_3 p + \xi_2 x_2. \end{cases} \quad (35)$$

Without loss of generality, the dynamics of an actuator is described by integrator [10]

$$S_2 : \dot{x}_2 = ku, \quad (36)$$

where $\mathbf{x}_1 = [q \ p]^T$ is state space of output subsystem, $\xi = [\xi_1 \ \xi_2 \ \xi_3]^T$ is the vector of positive unknown parameters of output subsystem, $k > 0$, x_2 is a control torque.

The pendulum energy is $H_0(x_1, \xi) = p^2/2 + \xi_1(1 - \cos q)$, the interaction hamiltonian is $H_1(x_1, \xi) = -\xi_2 q$. Obviously the terms of hamiltonian function are linear on ξ , then Assumption 1 is satisfied.

Control objective is boundedness of system trajectories, and achievement of (4) by an output subsystem, and the identification of parameters ξ .

Design control law according the proposed method.

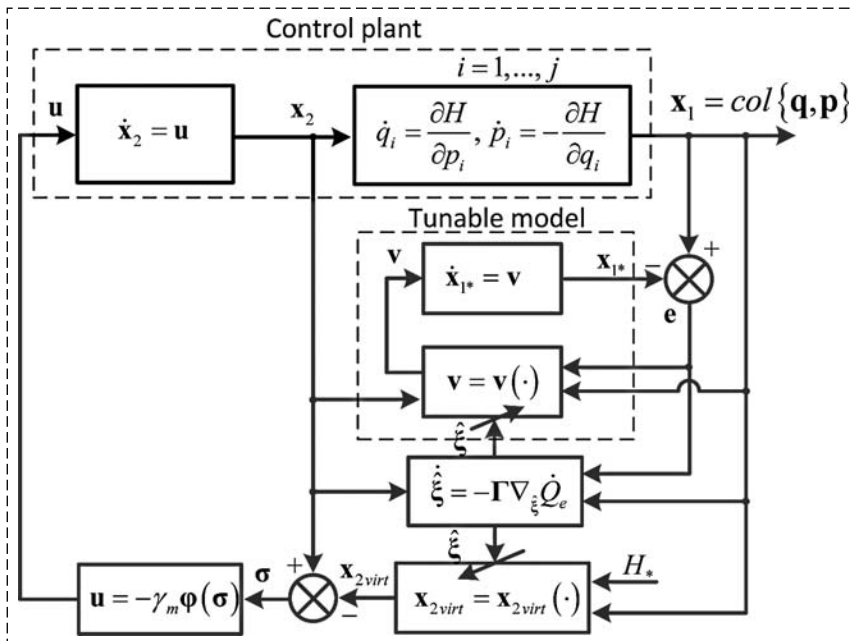


Fig. 1. Closed-loop energy-based adaptive control system

Stage 1. Introduce the desired manifold $x_2 = x_{2virt}$, where x_{2virt} is the virtual control of pendulum, and deviation from the tuned manifold in form (5)

$$\sigma = x_2 - x_{2virt}. \quad (37)$$

Design the "ideal" virtual control in form (7) with compensation of friction torque

$$x_{2virt}^* = -\gamma_x((H_0(\mathbf{x}_1, \xi) - H_*)p) + \frac{\xi_3}{\xi_2} p. \quad (38)$$

Note, compensating term $\frac{\xi_3}{\xi_2} p$ allows to apply the proposed method for a dissipative system (35). Verify condition (8)

$$\begin{aligned} w(\mathbf{x}_1, \xi, 0) &= (H_0 - H_*) \left(\frac{\partial H_0}{\partial q} \dot{q} + \frac{\partial H_0}{\partial p} \dot{p} \right) = \\ &= (H_0 - H_*) p (-\xi_3 p + \xi_2 x_{2virt}^*) = \\ &= -\gamma_x (H_0 - H_*)^2 \xi_2 p^2. \end{aligned}$$

Inequality (8) is valid, and $\rho_Q(Q) = 2\gamma_x \xi_2 p^2 Q$.

Stage 2. Taking Note 1 into consideration, reduce the dimension of a tunable model (23), because of only the second equation of system (35) depend on unknown parameters

$$\dot{p}_* = v. \quad (39)$$

The objective function (25) for model (39) is

$$Q_e(e) = 0,5e^2, \quad (40)$$

where $e = p - p_*$.

Stage 2.1. "Ideal" input of model (39) in form (27)

$$v_* = -\alpha_* e - \xi_1 \sin q - \xi_3 p + \xi_2 x_2, \quad \alpha_* < 0. \quad (41)$$

Stage 2.2. Replace the unknown parameters ξ by tunable ones $\hat{\xi}$ both in (35) and (38)

$$v = -\alpha_* e - \hat{\xi}_1 \sin q - \hat{\xi}_3 p + \hat{\xi}_2 x_2; \quad (42)$$

$$x_{2virt} = -\gamma_x((H_0(\mathbf{x}_1, \hat{\xi}) - H_*)p) + \frac{\hat{\xi}_3}{\hat{\xi}_2} p. \quad (43)$$

To obtain the adaptation law in form (30), calculate $w_e(\mathbf{x}_1, x_2, \hat{\xi})$ and gradients of $w_e(\mathbf{x}_1, x_2, \hat{\xi})$ on tunable parameters $\hat{\xi}$ in series

$$\dot{\hat{\xi}}_1 = -\gamma_1 e \sin q, \quad \dot{\hat{\xi}}_2 = \gamma_2 e x_2, \quad \dot{\hat{\xi}}_3 = -\gamma_3 e p, \quad (44)$$

where $\gamma_k > 0, k = 1...3$.

Introduce the limitation $\hat{\xi}_2(t) > \xi_{20}, \xi_{20} > 0$ is minimum of the admitted values of ξ_2 for particular plant, to restrict the level of virtual control.

Stage 3. Introduce the objective function in form (34)

$$R(\sigma) = 0,5\sigma^2. \quad (45)$$

Control law in form (32) either

$$u = -\gamma_m \sigma, \quad (46)$$

or

$$u = -\gamma_m \text{sign} \sigma. \quad (47)$$

As seen from (46) or (47), control law doesn't depend on actuator's parameters. To provide identifying properties, that is the persistently exciting condition, the desired energy is selected as $H_*(t) = 0,1(1 + \sin 10t)$.

Experimental results of swing-up control of closed-loop system (35)–(37), (39), (42)–(44), (47) are

shown on Fig. 2–4. Estimations of parameters obtained by the adaptation loop coincide with the values calculated based on response to the reference input and physical measurements (Fig. 2). Oscillation with the desired energy is occurred (Fig. 4).

Conclusion

The adaptive swing-up control of Hamiltonian plants with an actuator based on SBGM and energy-based approach is

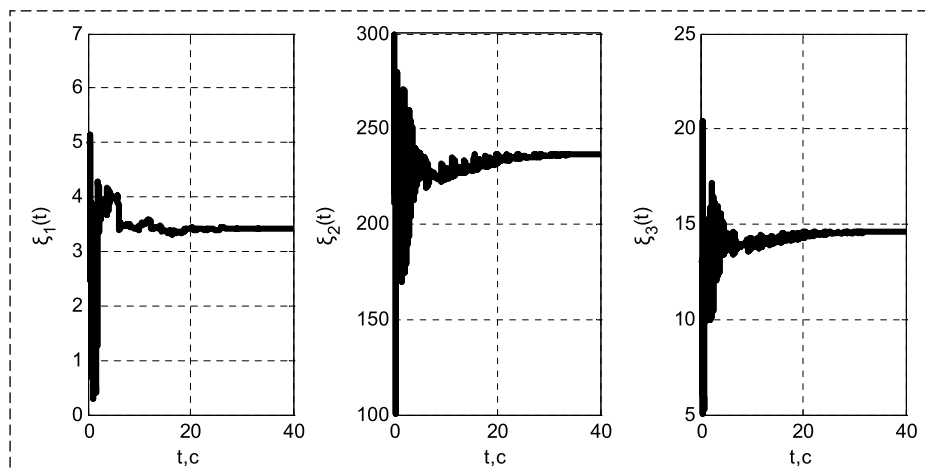


Fig. 2. Tuning of pendulum's parameters

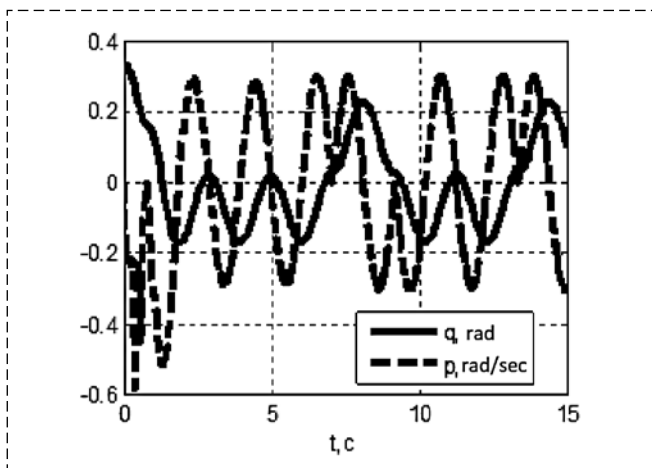


Fig. 3. Pendulum's trajectories

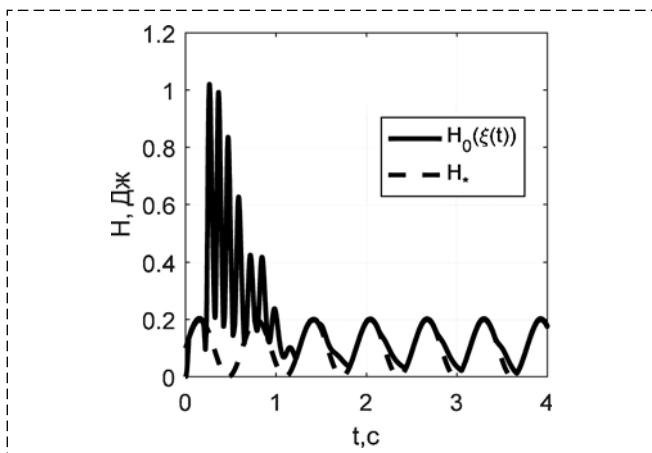


Fig. 4. Pendulum's energy

described. The proposed modification of SBGM allows to design control of cascade system with objective function depending on unknown parameters and trajectories of output subsystem. Reliability of received results is confirmed by both analytical calculations formulated as theorems, and computer simulations, and experimental results.

The offered method can be applied for adaptive swing-up control of electromechanical systems as well as for problem with objective function depending on unknown parameters and trajectories of output subsystem. For example, for linear equiva-

lents methods in the case of nonlinear coordinate transformation depend on unknown parameters.

References

1. **Fradkov A. L.** Swinging control of nonlinear oscillations, *International Journal of Control*, 1996, vol. 64, no. 6, pp. 1189–1202.
2. **Fantoni I., Lozano R., Spong M. W.** Energy based control of the Pendubot, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, vol. 45, iss. 4, pp. 725 – 729.
3. **Andrievskiy B. R.** Stabilization of inverted reaction wheel pendulum. Control in physical-technical systems. By edit. Fradkov A. L., SPb., Nauka, 2004, pp. 52–71.
4. **Spong M. W., Corke P., Lozano R.** Nonlinear control of the reaction wheel pendulum, *Automatica*, 2001, vol. 37, no. 11, pp. 1845–1851.
5. **Bobtsov A. A., Kolyubin S. A., Pyrkin A. A.** Stabilization of Reaction Wheel Pendulum on Movable Support with On-line Identification of Unknown Parameters, *Proc. 4th International Conference 'Physics and Control' (Physcon 2009)*, 2009.
6. **Peters S. C., Bobrow J. E., Iagnemma K.** Stabilizing a vehicle near rollover: An analogy to cart-pole stabilization, *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, pp. 5194–5200.
7. **Astrom K. J., Furuta K.** Swinging up a pendulum by energy control. *Automatica*, 2000, vol. 36, no. 2, pp. 287–295.
8. **Mori S., Nishihara H., Furuta K.** Control of unstable mechanical systems. Control of pendulum, *International Journal of Control*, 1976, vol. 23, no. 5, pp. 673–692.
9. **Wiklund M., Kristenson A., Astrom K.** A new strategy for swinging up an inverted pendulum, *Prepr. 12th IFAC World Congress*, 1993, vol. 9, pp. 151–154.
10. **Efimov D. V.** Robust and adaptive control of nonlinear oscillations, SPb., Nauka, 2005, 314p. (in Russian).
11. **Myshlyayev Y. I.** Linear system control algorithms in the case of parameter variations by sliding mode with tuning surface, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2009, no. 2, pp. 111–116.
12. **Myshlyayev Y. I., Finoshin A. V.** The speed bi-gradient method for model reference adaptive control of affine cascade systems, *1st IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems (IFAC MICNON) 2015*, Saint Petersburg, Russia, 24–26 June 2015, IFACPapersOnLine, 2015, vol. 48, iss. 11, pp. 489–495.
13. **Myshlyayev Y. I., Finoshin A. V.** Double-speed gradient algorithms in control of Hamiltonian systems, *Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems (Pyatnitskiy Conference), XII International Conference*, Moscow, Russia, 5–8 June 2012.
14. **Miroshnik I. V., Nikiforov V. O., Fradkov A. L.** Nonlinear and adaptive control of complex dynamical systems, SPb., Nauka, 2000, 549 p.
15. **Fradkov A. L.** Cybernetic physics: Principles and examples, SPb., Nauka, 2003, 208 p.
16. **Dolgov Y. A., Zyusun A. A., Finoshin A. V., Myshlyayev Y. I.** Swing-up control of the cart-pole system with drive motor by velocity bi-gradient method, *Engineering Journal: Science and Innovation*, Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2015, no. 1 (37).

А. В. Доценко, аспирант, anton.dozenko@gmail.com,
Департамент механики и мехатроники Инженерной академии РУДН,
Российский университет дружбы народов, г. Москва

Синтез системы разрешения коллизий для группы роботов в парадигме обучения без учителя

Групповое взаимодействие роботов без коллизий является актуальной задачей в области робототехники и интеллектуальных систем управления. Предлагается новый подход к решению проблемы избегания коллизий в постановке задачи синтеза оптимальной системы управления с минимально доступной информацией. Предполагается, что роботы имеют некоторую область видимости. Если статические или динамические фазовые ограничения находятся в области видимости робота, то он может реагировать на них. По условию считается, что группа гомогенная, а система управления для достижения терминального состояния уже находится на борту роботов. Искомая система управления для разрешения коллизий отвечает за управление роботом во время нахождения ближайшего соседа в области видимости робота. В данной работе рассматривается совместное решение задачи уклонения от столкновения для двух роботов посредством одного блока управления без назначения приоритетов. Задача решается в условиях полного отсутствия информации о среде и текущем состоянии других роботов в каждый момент времени. Роботы способны лишь определить координаты ближайших соседей, за исключением угла поворота, если те находятся в области видимости рассматриваемого робота.

Описан вычислительный эксперимент с группой мобильных роботов в качестве объектов управления. В качестве аппроксиматора функции управления по состоянию была взята полносвязная искусственная нейронная сеть типа многослойный перцептрон. Оптимизация весов перцептрона осуществлялась в парадигме обучения без учителя, методом эволюционных стратегий. Выборка сценариев, на которой проводилась оптимизация, генерировалась случайно, в начале итерации по поколениям, в то время как качество полученных весов оценивалось на фиксированной тестовой выборке сценариев.

Результаты эксперимента подтверждают способность найденного перцептрона отображать относительное состояние двух мобильных роботов в оптимальное управление, которое позволяет уйти от столкновения, что подтверждают приведенные графики из экспериментальной части.

Ключевые слова: синтез системы управления, нейронные сети, управление группой роботов, разрешение коллизий

Введение

Задача разрешения коллизий не имеет унифицированную математическую постановку из-за наличия широкого набора технических решений, а также требований к входным данным. Как следствие, на эту тему было написано много работ, и сформировалась некоторая иерархия подходов.

В части работ рассматривается задача управления группой роботов с избеганием столкновений путем планирования траекторий [1]. Суть данного подхода заключается в поиске роботом оптимального или близкого к оптимальному пути, который обеспечивал бы движение в конечное состояние без столкновений с другими роботами. Относительно доступной в процессе планирования маршрутов информации, а также способа и характера проводимых вычислений планировщики разделяются на два класса — сопряженный и несвязный. Первый подход подразумевает формирование

совместного конфигурационного пространства [2—9]. Плюсом такого подхода является возможность обеспечить оптимальность взаимодействия группы в целом, однако его применение представляется затруднительным или даже невозможным в случае многочисленных групп роботов из-за высокой размерности сопряженного пространства конфигураций. Несвязное планирование маршрутов реализуется путем применения методик, рассчитывающих пути роботов независимо от других роботов [10]. При несвязном подходе общая задача планирования пути для группы роботов делится на подзадачи, что позволяет быстро находить хорошие решения за счет потери оптимальности для многочисленных коллективов роботов. Несвязный подход, в свою очередь, подразделяется на: а) централизованный и б) децентрализованный.

Несвязные централизованные подходы [11—13] подразумевают независимое планирование роботами путей с последующим сообщением координатору своих намерений. Независимо

от того, какие цели преследуются группой, для поиска оптимальных маршрутов могут использоваться одиночные планировщики. Центральный орган, распознав намерения роботов, принимает или отклоняет их. Необходимость координатора обусловлена тем фактом, что роботы располагают лишь информацией о локальной окрестности.

В основе несвязного децентрализованного подхода [14] лежит распределенная система, где каждый робот пытается решить задачу в своей зоне ответственности. Изначально планируются отдельные пути для роботов [15], а затем в ходе следования роботами вычисленными маршрутами применяются методы, направленные на предвосхищение и предотвращение конфликтных ситуаций.

В контексте несвязного подхода избегание столкновений между роботами реализуется путем а) приоритетного планирования и б) координирования маршрутов. При координировании маршрутов сначала осуществляется отдельное планирование независимых траекторий, а затем корректируется управление роботом для избегания столкновений во время движения по спланированным маршрутам [16–19]. В случае приоритетного планирования каждому роботу присваивается некий приоритет [20–22]. Затем в порядке убывания приоритета выбираются роботы, и для каждого выбранного робота планируется траектория, позволяющая избежать столкновения со статическими препятствиями, а также с ранее выбранными роботами, которые рассматриваются как динамические препятствия. Координирование осуществляется посредством регулирования движения и реактивных подходов. Идея регулирования движения [23–26] состоит в том, чтобы заранее определить правила движения, которым роботы должны следовать. Реактивные подходы [27–30] берут на вооружение методику потенциальных полей и так называемых скоростных препятствий для быстрого поиска в режиме реального времени.

На сегодняшний день имеются и другие, более современные подходы. К ним можно отнести обучение с подкреплением. В задаче управления группой роботов эта парадигма была применена в работах [31–37].

Данная работа является продолжением работы [38] и нацелена на создание единой системы разрешения коллизий, полученной посредством синтеза.

Постановка задачи

Пусть задана гомогенная группа объектов, описываемая следующей системой ОДУ:

$$\begin{cases} \dot{x}^i = \frac{(u_1^i + u_2^i) \cos(\theta^i)}{2}; \\ \dot{y}^i = \frac{(u_1^i + u_2^i) \sin(\theta^i)}{2}; \\ \dot{\theta}^i = \frac{(u_1^i - u_2^i)}{2}, \end{cases} \quad (1)$$

где n — число роботов, $u_i \in U \subseteq \mathbb{R}^m$; U — ограниченное замкнутое множество, $i = 1, \dots, n$. На управления роботов наложены ограничения

$$u_1^i, u_2^i \in [-1, 1]. \quad (2)$$

Пусть задано максимальное время моделирования t^+ , начальные состояния

$$x_i(0) = x_i^0, y_i(0) = y_i^0, \theta_i(0) = \theta_i^0, \quad (3)$$

и терминальные состояния

$$x_i(t_f), y_i(t_f), \theta_i(t_f), \quad (4)$$

где t_f — время моделирования, $x_i^0, y_i^0, \theta_i^0 \in X_0 \subseteq \mathbb{R}^n$, $x_i(t_f), y_i(t_f), \theta_i(t_f) \in X_f \subseteq \mathbb{R}^n$, $i = 1, \dots, n$.

Условие отсутствия коллизий для пары роботов записываем в виде неравенства

$$D_c = R_c - \sqrt{(x_i - x_{j \neq i})^2 + (y_i - y_{j \neq i})^2} < 0, \quad (5)$$

где i — индекс рассматриваемого робота; j — индекс ближайшего робота, $j = \arg \min \{ \sqrt{(x_i - x_{j \neq i})^2 + (y_i - y_{j \neq i})^2} \}$, R_c — радиус, задающий габаритные размеры робота, $i, j = 1, \dots, n$. Всякий раз, когда для двух роботов нарушается условие (5), будем считать, что произошла коллизия. Будем также считать, что два робота находятся в области видимости друг друга, т. е. находятся во взаимодействии, если выполняется условие

$$D_i = R_i - \sqrt{(x_i - x_{j \neq i})^2 + (y_i - y_{j \neq i})^2} > 0, \quad (6)$$

где R_i — радиус взаимодействия робота; i — индекс рассматриваемого робота; j — индекс ближайшего робота, $j = \arg \min \{ \sqrt{(x_i - x_{j \neq i})^2 + (y_i - y_{j \neq i})^2} \}$, $i, j = 1, \dots, n$.

Функционал качества задан в следующем виде:

$$J = t_f + \sum_{i=1}^n \sqrt{d_1^2 + d_2^2} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \int_0^{t_f} D_c dt \rightarrow \min, \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} d_1 &= x_i(t_f) - x_i(t); \\ d_2 &= y_i(t_f) - y_i(t), \\ t_f &= \begin{cases} t, & \text{если } t < t^+ \text{ и } \sum_{i=1}^n \sqrt{d_1^2 + d_2^2} < \varepsilon, \\ t^+ + \sum_{i=1}^n \sqrt{d_1^2 + d_2^2} - \text{иначе.} \end{cases} \end{aligned}$$

Наконец, искомое управление задается как функция, зависящая от состояния:

$$\dot{s} = f(s, u = h(s)). \quad (8)$$

Цель — найти для объектов управления, описываемых системой (1), функцию управления (8), удовлетворяющую функционалу качества (7) и доставляющую роботов в терминальные состояния (4) из начальных состояний (3) при наложенных ограничениях на управления (2), а также динамических фазовых ограничениях (5).

Нейросетевая система разрешения коллизий

Когда робот вступает во взаимодействие с другим роботом, активируется система разрешения коллизий, иначе объект продолжает находиться под контролем системы управления, доставляющей робота в терминальное состояние.

На вход системы разрешения коллизий, кроме отклонения от терминального состояния $s_i(t) = [x_{i,f} - x_i(t) \ y_{i,f} - y_i(t)]^T$, подается отклонение от текущего состояния соседа $s^N(t) = [x_i(t) - x_{j \neq i}(t) \ y_i(t) - y_{j \neq i}(t)]^T$. По условию роботы не могут знать направление движения соседа, поэтому было решено дополнить входной сигнал отклонением от состояния соседа в предыдущий момент времени $s^N(t-1) = [x_i(t-1) - x_{j \neq i}(t-1) \ y_i(t-1) - y_{j \neq i}(t-1)]^T$.

Во время движения робота, если выполняется условие (6), то активируется система разрешения коллизий, и в качестве входного сигнала на нее подается вектор, содержащий в себе следующие компоненты:

- отклонение от терминального состояния $s_i(t)$;
- отклонение от состояния соседнего робота $s^N(t)$ в текущий момент времени без учета угла, где $N = \arg \min \{ \sqrt{(x_i - x_{j \neq i})^2 + (y_i - y_{j \neq i})^2} \}$;

- отклонение от состояния соседнего робота $s^N(t-1)$ в предыдущий момент времени, без учета угла.

В ходе эксперимента была выбрана следующая архитектура искусственной нейронной сети:

- первый скрытый слой из 60 нейронов;
- второй скрытый слой из 60 нейронов;
- выходной слой с двумя нейронами.

Как было сказано выше, в качестве входного сигнала выступает общий вектор s , состоящий из компонент векторов $s_i(t)$, $s^N(t)$, $s^N(t-1)$. Векторизованные вычисления на первом скрытом слое с 60 нейронами и с набором весов $w_1, w_2, \dots, w_{60}$, $w_i = [w_{i1}, \dots, w_{i7}]^T$ можно описать следующим образом:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} y_1^1 \\ \vdots \\ y_{60}^1 \end{bmatrix} &= y^1 = f(W^1 s) = \begin{bmatrix} f((w_1^1)^T s) \\ \vdots \\ f((w_{60}^1)^T s) \end{bmatrix}; \\ W^1 &= \begin{bmatrix} w_1^1 \\ \vdots \\ w_{60}^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{1,1}^1 & \dots & w_{1,7}^1 \\ \vdots & & \vdots \\ w_{60,1}^1 & \dots & w_{60,7}^1 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

где $f(x) = \max(0, x)$ — функция активации на данном слое. Выходной вектор первого слоя будет входным вектором для второго скрытого слоя, также состоящего из 60 нейронов:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} y_1^2 \\ \vdots \\ y_{60}^2 \end{bmatrix} &= y^2 = f(W^2 y^1) = \begin{bmatrix} f((w_1^2)^T y^1) \\ \vdots \\ f((w_{60}^2)^T y^1) \end{bmatrix}, \\ W^2 &= \begin{bmatrix} w_1^2 \\ \vdots \\ w_{60}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{1,1}^2 & \dots & w_{1,60}^2 \\ \vdots & & \vdots \\ w_{60,1}^2 & \dots & w_{60,60}^2 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

где $f(x) = \max(0, x)$ — функция активации на данном слое. Размерность конечного слоя совпадает с размерностью вектора управления:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} &= u = f(W^3 y^2) = \begin{bmatrix} f((w_1^3)^T y^2) \\ f((w_2^3)^T y^2) \end{bmatrix}, \\ W^3 &= \begin{bmatrix} w_1^3 \\ w_2^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{1,1}^3 & \dots & w_{1,60}^3 \\ w_{2,1}^3 & \dots & w_{2,60}^3 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

где $f(x) = \tanh(x)$ — функция активации. Использование гиперболического тангенса на выходе персептрона мотивировано тем, что в этом случае нет необходимости проводить нормализацию выходного вектора.

Инициализацию весов на всех слоях проводили по схеме Ксавье Глоро [39] со следующим распределением при равномерной инициализации:

$$w_i \sim U \left[-\sqrt{\frac{6}{n_{in} + n_{out}}}, \sqrt{\frac{6}{n_{in} + n_{out}}} \right].$$

Алгоритм оптимизации весовых коэффициентов нейронной сети

Для оптимизации весовых коэффициентов персептрона в данной работе используется метод эволюционных стратегий [40]. В целях уменьшения дисперсии в эксперименте проводилась зеркальная выборка [41], т.е. оценивался функционал качества не только вектора ε , но также вектора $-\varepsilon$. Критически важным дополнением к алгоритму послужило ранговое преобразование функционала качества с помощью функции полезности [42]. В данной работе использовалась следующая функция полезности:

$$F(n) = \frac{\max \left(0, \log \left(\frac{\lambda}{2} + 1 \right) - \log n \right)}{\sum_{i=1}^{\lambda} \max \left(0, \log \left(\frac{\lambda}{2} + 1 \right) - \log i \right)}, \quad (9)$$

где n — порядковый номер вектора возмущения.

Алгоритм

Начало

Ввод: скорость обучения α , стандартное отклонение возмущающего сигнала σ , число эпох обучения E , число возмущений λ , число тестовых сценариев m , число тренировочных сценариев l , начальные весовые коэффициенты персептрона ψ_0 .

Сгенерировать m сценариев парных взаимодействий роботов с коллизиями и m сценариев без коллизий;

for $e \leftarrow 1$ to E *do*

сгенерировать l сценариев парных взаимодействий роботов с коллизиями и без коллизий;
сгенерировать возмущения $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_\lambda \sim N(0, I)$;

for $i \leftarrow 1$ to λ *do*

вычислить значение функционала для l сценариев $J_i(\psi_e + \sigma \varepsilon_i)$

End for;

отсортировать значения функционалов $\tilde{J}_i = (J_1 \leq \dots \leq J_\lambda)$;

осуществить переход от функционалов качества к значениям функции полезности $F = (F_1 \leq \dots \leq F_\lambda)$;

обновить веса нейронной сети

$$\psi_{e+1} \leftarrow \psi_e - \alpha \frac{1}{\lambda \sigma} \sum_{i=1}^{\lambda} F_i \varepsilon_i;$$

оценить значение функционала для m тестовых сценариев $J_i(\psi_e + \sigma \varepsilon_i)$;

End for

Вывод: персептрон с оптимизированными весовыми коэффициентами ψ^0 .

Конец

Компьютерное моделирование

В ходе компьютерного моделирования был проведен численный синтез системы разрешения коллизий на сгенерированных сценариях. После оптимизации весов многослойного персептрона система была протестирована на сценариях из тестовой выборки. В процессе оптимизации весовых коэффициентов нейронной сети использовались следующие значения гиперпараметров алгоритма: $\alpha = 0,01$, $\sigma = 0,44$, $E = 59$, $\lambda = 200$, $p = 5$ (штраф за столкновение). На рис. 1 представлены усредненные значения функционалов десяти сценариев взаимодействия роботов без коллизий (пунктирная линия с треугольным маркером) и усредненные значения функционалов десяти сценариев взаимодействия с коллизиями (сплошная линия)

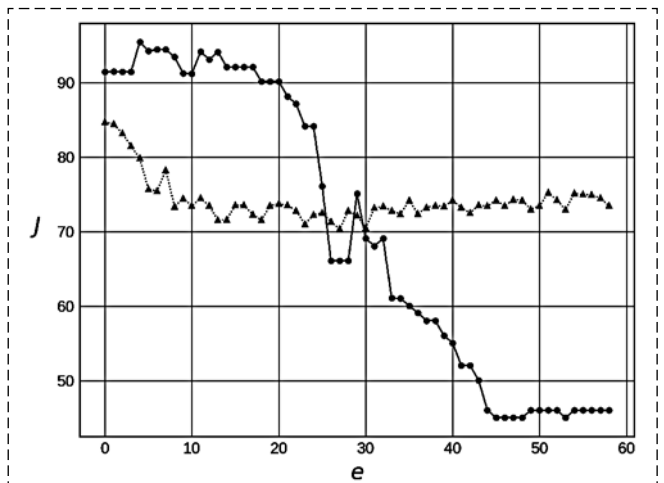


Рис. 1. Значения функционала на тестовых выборках
Fig. 1. Functional values of the testing samples

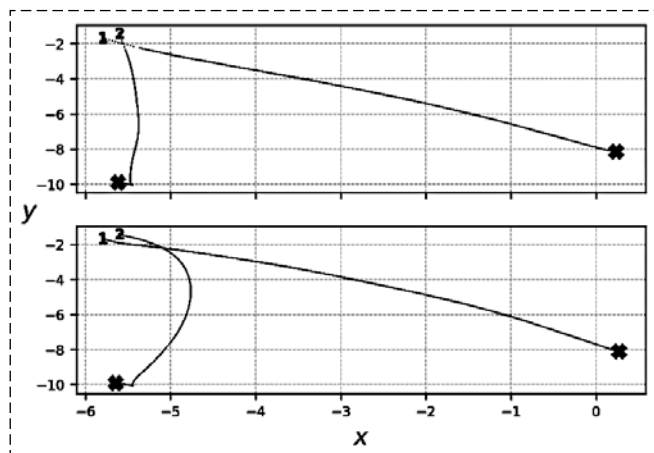


Рис. 2. Траектории роботов. Взаимодействие с коллизиями
Fig. 2. Robots trajectories. Interaction with collisions

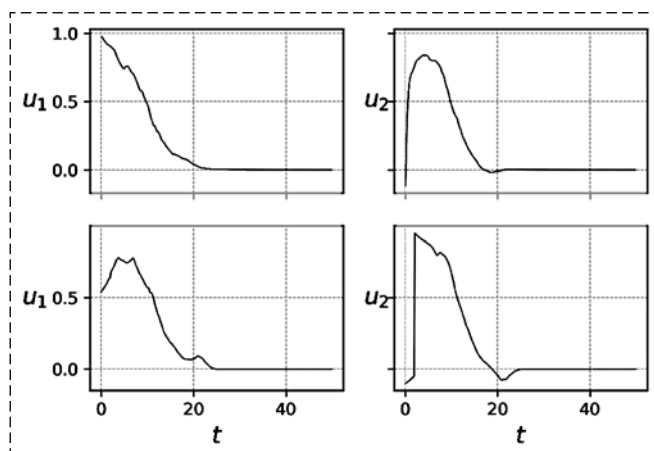


Рис. 3. Управления на гусеницах первого робота без персептрона (верхний ряд) и с персептроном (нижний ряд), соответствующие сценарию на рис. 2
Fig. 3. Controls on the tracks of the first robot without perceptron (top row) and with perceptron (bottom row), corresponding to the scenario in fig. 2

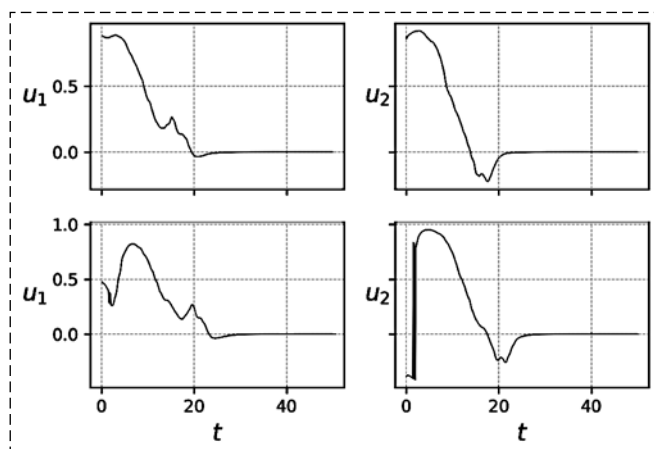


Рис. 4. Управления на гусеницах второго робота без персептрона (верхний ряд) и с персептроном (нижний ряд), соответствующие сценарию на рис. 2
Fig. 4. Controls on the tracks of the second robot without perceptron (top row) and with perceptron (bottom row), corresponding to the scenario in fig. 2

с круглым маркером) за 59 эпох оптимизации весовых коэффициентов.

На рис. 2 представлен сценарий взаимодействия пары роботов с коллизиями. Верхняя и нижняя части графика отображают траектории роботов для одного и того же набора начальных и терминальных состояний без персептрона и с персептроном соответственно. На рис. 2 пунктирной линией обозначены участки траекторий, где были зафиксированы коллизии. Сплошной линией отмечены участки траекторий без столкновений. Начальное состояние роботов обозначено цифрой, соответствующей их порядковому номеру, а терминальное состояние обозначено крестом. На рис. 3, 4 представлены графики функций управления роботов с системой разрешения коллизий в виде многослойного персептрона.

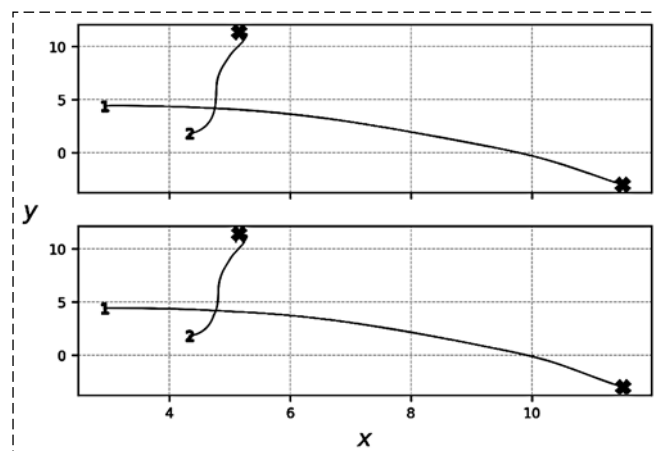


Рис. 5. Траектории роботов. Взаимодействие без коллизий
Fig. 5. Robots trajectories. Interaction without collisions

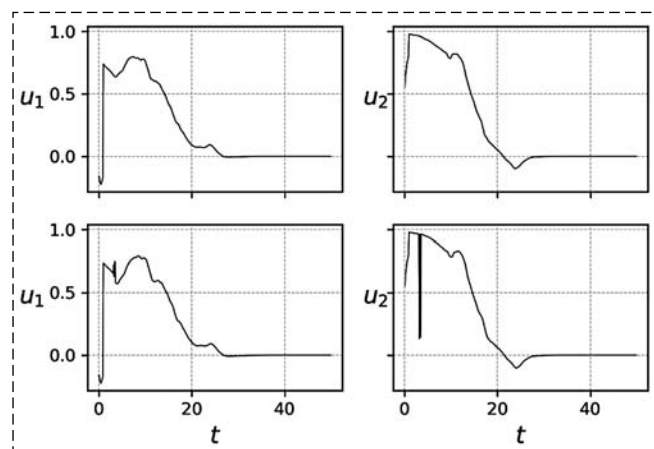


Рис. 6. Управления на гусеницах первого робота без персептрона (верхний ряд) и с персептроном (нижний ряд), соответствующие сценарию на рис. 5
Fig. 6. Controls on the tracks of the first robot without perceptron (top row) and with perceptron (bottom row), corresponding to the scenario in fig. 5

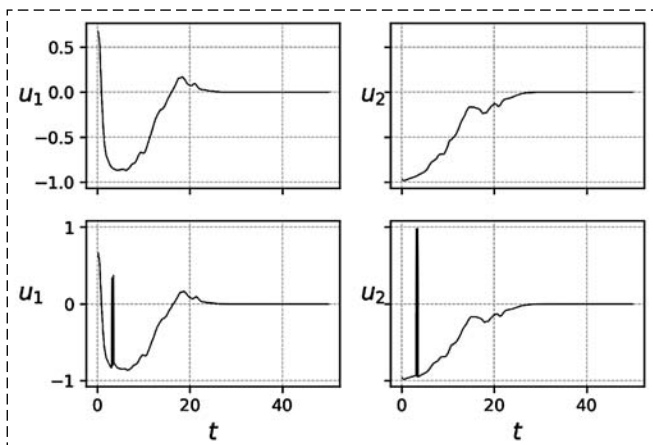


Рис. 7. Управления на гусеницах второго робота без перцептрона (верхний ряд) и с перцептроном (нижний ряд), соответствующие сценарию на рис. 5

Fig. 7. Controls on the tracks of the second robot without perceptron (top row) and with perceptron (bottom row), corresponding to the scenario in fig. 5

На рис. 5 представлен сценарий взаимодействия пар роботов без коллизий. На рис. 6, 7 показаны графики управления роботов, соответствующие рис.5 (без коллизий).

Рис. 2 с траекториями роботов демонстрирует способность оптимизированного многослойного перцептрона разрешать коллизии для сценариев из тестовой выборки. Более того, полученная система способна поддерживать оптимальную траекторию роботов в случае, когда роботы входят во взаимодействие, но не сталкиваются, о чем свидетельствует рис. 5.

Однако на некоторых сценариях перцептрон работает нестабильно, выдавая управление, которое приводит к столкновению роботов, или к ситуации, когда роботы не могут разъехаться, непрерывно колеблясь в некоторой локальной зоне.

Заключение

Решение задачи синтеза методами классической теории управления возможно только для линейных и узкого класса нелинейных систем. Активное развитие нейронных сетей позволяет решать задачу синтеза численно, не прибегая к методам из классической теории управления, что было продемонстрировано в экспериментальной части данной статьи.

Приведенный в данной статье подход является масштабируемым: несмотря на тот факт, что обучение происходит на парных взаимодействиях роботов, использовать полученный перцептрон можно также в случае многочисленной группы роботов.

Список литературы

1. LaValle S. M., Hutchinson S. A. Optimal Motion Planning for Multiple Robots Having Independent Goals // *IEEETrans. on Robotics and Automation*. 1998. 14(6). P. 912–925.
2. Barraquand J., Latombe J. C. Robot motion planning: A distributed representation approach // *The International Journal of Robotics Research*. 1991. Vol. 10, N. 6. P. 628–649.
3. Barraquand J., Latombe J. C. Controllability of Mobile Robots with Kinematic Constraints // *STANFORD UNIV CA DEPT OF COMPUTER SCIENCE*. 1990. N. STAN-CS-90-1317.
4. Brooks R. A., Lozano-Perez T. A subdivision algorithm in configuration space for findpath with rotation // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1985. N. 2. P. 224–233.
5. Faverjon B. Object level programming of industrial robots // *Proceedings, 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE*. 1986. Vol. 3. P. 1406–1412.
6. Faverjon B., Tournassoud P. A local based approach for path planning of manipulators with a high number of degrees of freedom // *Proceedings. 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE*. 1987. Vol. 4. P. 1152–1159.
7. Barraquand J., Langlois B., Latombe J. C. Robot motion planning with many degrees of freedom and dynamic constraints // *The fifth international symposium on Robotics research*. 1991. P. 435–444.
8. Zhu D., Latombe J. C. New heuristic algorithms for efficient hierarchical path planning // *STANFORD UNIV CA DEPT OF COMPUTER SCIENCE*. 1989. N. STAN-CS-89-1279.
9. Parsons D., Canny J. A motion planner for multiple mobile robots // *Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE*. 1990. P. 8–13.
10. LaValle S. M. Planning algorithms. Cambridge university press, 2006.
11. Sanchez G., Latombe J. C. Using a PRM planner to compare centralized and decoupled planning for multi-robot systems // *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 02CH37292), IEEE*. 2002. Vol. 2. P. 2112–2119.
12. Oh J. H., Park J. H., Lim J. T. Centralized decoupled path planning algorithm for multiple robots using the temporary goal configurations // *2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation. IEEE*. 2011. P. 206–209.
13. Van Den Berg J., Snoeyink J., Lin M. C., Manocha D. Centralized path planning for multiple robots: Optimal decoupling into sequential plans // *Robotics: Science and systems*. 2009. Vol. 2, N. 2(5). P. 2–3.
14. Devasia S., Iamratanakul D., Chatterji G., Meyer G. Decoupled conflict-resolution procedures for decentralized air traffic control // *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*. 2011. Vol. 12, N. 2. P. 422–437.
15. Ермолов И. Л., Илюхин Ю. В., Собольников С. А. Планирование траекторий движения в группе автономных мобильных коммуникационных роботов // *Вестник МГТУ Станкин*. 2012. № 4. С. 96–100.
16. O'Donnell P. A., Lozano-Pérez T. Deadlock-free and collision-free coordination of two robot manipulators // *ICRA*. 1989. Vol. 89. P. 484–489.
17. Griswold N. C., Eem J. Control for mobile robots in the presence of moving objects // *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1990. Vol. 6, N. 2. P. 263–268.
18. Pan T. J., Luo R. C. Motion planning for mobile robots in a dynamic environment with moving obstacles // *Proceedings, IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE*. 1990. P. 578–583.
19. Rude M. Collision avoidance by using space-time representations of motion processes // *Autonomous Robots*. 1997, vol. 4, no. 1. P. 101–119.
20. Erdmann M., Lozano-Perez T. On multiple moving objects // *Algorithmica*. 1987. Vol. 2, N. 1–4. P. 477.
21. Bennewitz M., Burgard W., Thrun S. Finding and optimizing solvable priority schemes for decoupled path planning techniques for teams of mobile robots // *Robotics and autonomous systems*. 2002. Vol. 41, N. 2–3. P. 89–99.

22. **Clark C. M., Bretl T., Rock S.** Applying kinodynamic randomized motion planning with a dynamic priority system to multi-robot space systems // *Proceedings, IEEE Aerospace Conference, IEEE*. 2002. Vol. 7. P. 7.
23. **Grossman D. D.** Traffic control of multiple robot vehicles // *IEEE Journal on Robotics and Automation*. 1988. Vol. 4, N. 5. P. 491–497.
24. **Lumelsky V. J., Harinarayan K. R.** Decentralized motion planning for multiple mobile robots: The cocktail party model // *Autonomous Robots*. 1997. Vol. 4, N. 1. P. 121–135.
25. **Wang J., Beni G.** Distributed computing problems in cellular robotic systems // *EEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, Towards a New Frontier of Applications, IEEE*. 1990. P. 819–826.
26. **Kato S., Nishiyama S., Takeno J.** Coordinating mobile robots by applying traffic rules // *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE*. 1992. Vol. 3. P. 1535–1541.
27. **Koren Y., Borenstein J.** Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation // *ICRA*. 1991. Vol. 2. P. 1398–1404.
28. **Kapadia M., Singh S., Hewlett W., Reinman G., Faloutsos P.** Parallelized egocentric fields for autonomous navigation // *The Visual Computer*. 2012. Vol. 28, N. 12. P. 1209–1227.
29. **Wang L., Li Z., Wen C., He R., Guo F.** Reciprocal Collision Avoidance for Nonholonomic Mobile Robots // 2018 15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV). IEEE. 2018. P. 371–376.
30. **Huang X., Zhou L., Guan Z., Li Z., Wen C., He R.** Generalized Reciprocal Collision Avoidance for Non-holonomic Robots // 2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). IEEE. 2019. P. 1623–1628.
31. **Long P., Liu W., Pan J.** Deep-learned collision avoidance policy for distributed multiagent navigation // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2017. Vol. 2, N. 2. P. 656–663.
32. **Matarić M. J.** Reinforcement learning in the multi-robot domain // *Robot colonies*. Springer, Boston, MA, 1997. P. 73–83.
33. **Stone P., Veloso M.** Multiagent systems: A survey from a machine learning perspective // *Autonomous Robots*. 2000. Vol. 8, N. 3. P. 345–383.
34. **Yang E., Gu D.** Multiagent reinforcement learning for multi-robot systems: A survey. tech. rep, 2004.
35. **Panaït L., Luke S.** Cooperative multi-agent learning: The state of the art // *Autonomous agents and multi-agent systems*. 2005. Vol. 11, N. 3. P. 387–434.
36. **Godoy J. E., Karamouzas I., Guy S. J., Gini M.** Adaptive learning for multi-agent navigation // *Proceedings of the 2015 International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*. 2015. P. 1577–1585.
37. **Kretzschmar H., Spies M., Sprunk C., Burgard W.** Socially compliant mobile robot navigation via inverse reinforcement learning // *The International Journal of Robotics Research*. 2016. Vol. 35, N. 11. P. 1289–1307.
38. **Dotsenko A., Diveev A., Cevallos J. P. C.** Collision avoidance at swarm regrouping using modified network operator method with various number of arguments // 2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), IEEE. 2019. P. 768–773.
39. **Glorot X., Bengio Y.** Understanding the difficulty of training deep feedforward neural networks // *Proceedings of the thirteenth international conference on artificial intelligence and statistics*. 2010. P. 249–256.
40. **Salimans T., Ho J., Chen X., Sidor, S., Sutskever I.** Evolution strategies as a scalable alternative to reinforcement learning // *arXiv preprint arXiv:1703.03864*, 2017.
41. **Brockhoff D., Auger A., Hansen N., Arnold D. V., Hohm T.** Mirrored sampling and sequential selection for evolution strategies // *International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2010. P. 11–21.
42. **Wierstra D., Schaul T., Glasmachers T., Sun Y., Peters J., Schmidhuber J.** Natural evolution strategies // *The Journal of Machine Learning Research*, 2014. Vol. 15, N. 1. P. 949–980.

Collision Avoidance System Synthesis for a Group of Robots in Unsupervised Learning Paradigm

A. V. Dotsenko, anton.dozenko@gmail.com

People's Friendship University of Russia, Moscow, 117198, Russian Federation

Corresponding author: Dotsenko A. V., Postgraduate Student at Department of Mechanics and Mechatronics, Academy of Engineering, People's Friendship University of RussiaMoscow, 117198, Russian Federation, e-mail: anton.dozenko@gmail.com

Accepted on March 16, 2020

Abstract

Collision avoidance is very important problem in the domain of multi-robot interaction. In this paper we propose a new approach of collision avoidance in the context of the optimal control system synthesis problem definition with minimal information available. It is assumed that robots have a certain scope within which they can interact with static and dynamic phase constraints. A group of robots is considered to be homogeneous, and control system unit for reaching terminal states already available to robots. The control system which is responsible for collision avoidance is only activated when the nearest neighbor is located in the scope of the considered robot. The first important feature of this work is the fact that the collision avoidance between two robots is reciprocal with joint control system, without assigning priorities. Another key feature of this work is the complete absence of information about the environment and the current state of other robots at given time. Robots only share information with nearest neighbors if they locate in the scope of each other. We also present a computational experiment with mobile robots as control objects. A multilayer perceptron was used to approximate the control function. Weights of the perceptron were optimized in unsupervised paradigm by an algorithm belonging to the evolutionary strategies class. At the beginning of each epoch we generate a sample of collision scenarios for optimization, while the quality criterion of the achieved weights at the end of epoch is evaluated on a fixed test sample. Experimental results demonstrate strong ability of the optimized multilayer perceptron to map the relative state of two mobile robots to controls in order to avoid collisions.

Keywords: control system synthesis, neural networks, control of a group of robots, collision avoidance

For citation:

Dotsenko A. V. Reciprocal Collision Avoidance System Synthesis for a Group of Robots in Unsupervised Learning Paradigm, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 7, pp. 420–427.

DOI: 10.17587/mau.21.420-427

References

1. LaValle S. M., Hutchinson S. A. Optimal Motion Planning for Multiple Robots Having Independent Goals, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 1998, vol. 14, no. 6, pp. 912–925.
2. Barraquand J., Latombe J. C. Robot motion planning: A distributed representation approach, *The International Journal of Robotics Research*, 1991, vol. 10, no. 6, pp. 628–649.
3. Barraquand J., Latombe J. C. Controllability of Mobile Robots with Kinematic Constraints, *STANFORD UNIV CA DEPT OF COMPUTER SCIENCE*, 1990, no. STAN-CS-90-1317.
4. Brooks R. A., Lozano-Perez T. A subdivision algorithm in configuration space for findpath with rotation, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1985, no. 2, pp. 224–233.
5. Faverjon B. Object level programming of industrial robots, *Proceedings, 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE*, 1986, vol. 3, pp. 1406–1412.
6. Faverjon B., Tournassoud P. A local based approach for path planning of manipulators with a high number of degrees of freedom, *Proceedings, 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE*, 1987, vol. 4, pp. 1152–1159.
7. Barraquand J., Langlois B., Latombe J. C. Robot motion planning with many degrees of freedom and dynamic constraints, *The Fifth International Symposium On Robotics Research*, 1991, pp. 435–444.
8. Zhu D., Latombe J. C. New heuristic algorithms for efficient hierarchical path planning, *STANFORD UNIV CA DEPT OF COMPUTER SCIENCE*, 1989, no. STAN-CS-89-1279.
9. Parsons D., Canny J. A motion planner for multiple mobile robots, *Proceedings, IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE*, 1990, pp. 8–13.
10. LaValle S. M. Planning algorithms, Cambridge university press, 2006.
11. Sanchez G., Latombe J. C. Using a PRM planner to compare centralized and decoupled planning for multi-robot systems, *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Cat. No. 02CH37292), IEEE, 2002, vol. 2, pp. 2112–2119.
12. Oh J. H., Park J. H., Lim J. T. Centralized decoupled path planning algorithm for multiple robots using the temporary goal configurations //2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation. IEEE, 2011, P. 206–209.
13. Van Den Berg J., Snoeyink J., Lin M. C., Manocha D. Centralized path planning for multiple robots: Optimal decoupling into sequential plans, *Robotics: Science and Systems*, 2009, vol. 2, no. 2(5), P. 2–3.
14. Devasia S., Iamratanakul D., Chatterji G., Meyer G. Decoupled conflict-resolution procedures for decentralized air traffic control, *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, 2011, vol. 12, no. 2, pp. 422–437.
15. Ermolov I. L., Iljuchin Ju. V., Sobolnikov S. A. Trajectory planning for autonomous mobile communicational robots, *Vestnik MGTU Stankin*, 2012, no. 4, pp. 96–100 (in Russian).
16. O'Donnell P. A., Lozano-Pérez T. Deadlock-free and collision-free coordination of two robot manipulators, *ICRA*, 1989, vol. 89, pp. 484–489.
17. Griswold N. C., Eem J. Control for mobile robots in the presence of moving objects, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1990, vol. 6, no. 2, pp. 263–268.
18. Pan T. J., Luo R. C. Motion planning for mobile robots in a dynamic environment with moving obstacles, *Proceedings, IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE*, 1990, pp. 578–583.
19. Rude M. Collision avoidance by using space-time representations of motion processes, *Autonomous Robots*, 1997, vol. 4, no. 1, pp. 101–119.
20. Erdmann M., Lozano-Perez T. On multiple moving objects, *Algorithmica*, 1987, vol. 2, no. 1–4, pp. 477.
21. Bennewitz M., Burgard W., Thrun S. Finding and optimizing solvable priority schemes for decoupled path planning techniques for teams of mobile robots, *Robotics and autonomous systems*, 2002, vol. 41, no. 2–3, pp. 89–99.
22. Clark C. M., Bretl T., Rock S. Applying kinodynamic randomized motion planning with a dynamic priority system to multi-robot space systems, *Proceedings, IEEE Aerospace Conference, IEEE*, 2002, vol. 7, pp. 7.
23. Grossman D. D. Traffic control of multiple robot vehicles, *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1988, vol. 4, no. 5, pp. 491–497.
24. Lumelsky V. J., Harinarayan K. R. Decentralized motion planning for multiple mobile robots: The cocktail party model, *Autonomous Robots*, 1997, vol. 4, no. 1, pp. 121–135.
25. Wang J., Beni G. Distributed computing problems in cellular robotic systems, *EEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, Towards a New Frontier of Applications, IEEE*, 1990, pp. 819–826.
26. Kato S., Nishiyama S., Takeno J. Coordinating mobile robots by applying traffic rules, *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE*, 1992, vol. 3, pp. 1535–1541.
27. Koren Y., Borenstein J. Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation, *ICRA*, 1991, vol. 2, pp. 1398–1404.
28. Kapadia M., Singh S., Hewlett W., Reinman G., Faloutsos P. Parallelized egocentric fields for autonomous navigation, *The Visual Computer*, 2012, vol. 28, no. 12, pp. 1209–1227.
29. Wang L., Li Z., Wen C., He R., Guo F. Reciprocal Collision Avoidance for Nonholonomic Mobile Robots, *2018 15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV), IEEE*, 2018, pp. 371–376.
30. Huang X., Zhou L., Guan Z., Li Z., Wen C., He R. Generalized Reciprocal Collision Avoidance for Non-holonomic Robots, *2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), IEEE*, 2019, pp. 1623–1628.
31. Long P., Liu W., Pan J. Deep-learned collision avoidance policy for distributed multiagent navigation, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2017, vol. 2, no. 2, pp. 656–663.
32. Mataric M. J. Reinforcement learning in the multi-robot domain, *Robot colonies*, Springer, Boston, MA, 1997, pp. 73–83.
33. Stone P., Veloso M. Multiagent systems: A survey from a machine learning perspective, *Autonomous Robots*, 2000, vol. 8, no. 3, pp. 345–383.
34. Yang E., Gu D. Multiagent reinforcement learning for multi-robot systems: A survey. tech. rep, 2004.
35. Panait L., Luke S. Cooperative multi-agent learning: The state of the art, *Autonomous agents and multi-agent systems*, 2005, vol. 11, no. 3, pp. 387–434.
36. Godoy J. E., Karamouz S., Guy S. J., Gini M. Adaptive learning for multi-agent navigation, *Proceedings of the 2015 International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 2015, pp. 1577–1585.
37. Kretschmar H., Spies M., Sprunk C., Burgard W. Socially compliant mobile robot navigation via inverse reinforcement learning, *The International Journal of Robotics Research*, 2016, vol. 35, no. 11, pp. 1289–1307.
38. Dotsenko A., Diveev A., Cevallos J. P. C. Collision avoidance at swarm regrouping using modified network operator method with various number of arguments, *2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), IEEE*, 2019, pp. 768–773.
39. Glorot X., Bengio Y. Understanding the difficulty of training deep feedforward neural networks, *Proceedings of the thirteenth international conference on artificial intelligence and statistics*, 2010, pp. 249–256.
40. Salimans T., Ho J., Chen X., Sidor S., Sutskever I. Evolution strategies as a scalable alternative to reinforcement learning, *arXiv preprint arXiv:1703.03864*, 2017.
41. Brockhoff D., Auger A., Hansen N., Arnold D. V., Hohm T. Mirrored sampling and sequential selection for evolution strategies, *International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2010, pp. 11–21.
42. Wierstra D., Schaul T., Glasmachers T., Sun Y., Peters J., Schmidhuber J. Natural evolution strategies, *The Journal of Machine Learning Research*, 2014, vol. 15, no. 1, pp. 949–980.

А. И. Дивеев, д-р техн. наук, проф., aidiveev@mail.ru,
Е. Ю. Шмалько, канд. техн. наук, e.shmalko@gmail.com,
ФИЦ "Информатика и управление" РАН, Москва,
О. Хуссейн, аспирант, eng.napo.oubai@gmail.com,
Российский университет дружбы народов, Москва

Управление квадрокоптером методом сетевого оператора на основе многоточечной стабилизации¹

Представлено решение задачи оптимального управления квадрокоптером в условиях фазовых ограничений численным методом сетевого оператора на основе многоточечной стабилизации. Согласно данному подходу на первом этапе решается задача синтеза системы управления. В результате обеспечивается стабилизация квадрокоптера относительно некоторой точки пространства состояний. На втором этапе находится такая последовательность точек стабилизации в пространстве состояний, что переключение точек стабилизации в фиксированные моменты времени обеспечивает движение квадрокоптера из начального состояния в терминальное с оптимальным значением критерия качества с учетом фазовых ограничений. Для решения задачи синтеза системы стабилизации используется метод сетевого оператора. Метод является численным и в отличие от известных аналитических методов позволяет в автоматическом режиме без конкретного анализа правых частей модели синтезировать систему управления. Метод позволяет с помощью генетического алгоритма находить структуру и параметры математического выражения в закодированном виде. Код метода сетевого оператора представляет собой целочисленную верхнетреугольную матрицу. На этапе решения задачи синтеза математическая модель движения квадрокоптера декомпозируется на угловое и пространственное движения для того, чтобы выделить отдельно компоненты управления для углового и пространственного движений соответственно. Синтезированная система стабилизации состоит из двух подсистем, соединенных последовательно, для пространственного и углового движения. В качестве управлений для пространственного движения использовались моменты вокруг осей и суммарная тяга всех винтов квадрокоптера. Входами для системы стабилизации углового движения являются желаемые углы наклона квадрокоптера. Задача стабилизации рассматривается как общая задача синтеза системы управления. Методом сетевого оператора ищется одна функция управления, которая обеспечивает стабилизацию объекта в заданной точке рассматриваемого пространства состояний из множества начальных условий. На этапе поиска точек равновесия используется эволюционный алгоритм роя частиц. Приведен численный пример решения задачи оптимального управления квадрокоптером с четырьмя фазовыми ограничениями.

Ключевые слова: оптимальное управление, синтез системы стабилизации, метод сетевого оператора, эволюционный алгоритм, квадрокоптер, фазовые ограничения

Введение

Сегодня квадрокоптеры являются очень популярным роботизированным объектом, который используется в различных прикладных задачах, для мониторинга местности, видеосъемки и др. В настоящей работе решается задача оптимального управления квадрокоптером. Численные методы решения задачи оптимального управления можно объединить в два класса [1–4] — на основе прямого и непрямого под-

ходов. Прямой подход состоит в редукции к конечномерной задаче нелинейного программирования [2]. Непрямой подход заключается в решении краевой задачи, полученной на основе принципа максимума Понтрягина [4]. Оба известных подхода сталкиваются с вычислительными проблемами, когда в задаче оптимального управления существуют фазовые ограничения [5–7], которые часто приводят к потере свойства унимодальности целевого функционала [8].

Одна из основных проблем оптимального управления состоит в том, что полученное оптимальное управление нельзя использовать на практике без построения системы стабилизации. При этом сама система стабилизации из-

¹Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований № 18-29-03061-мк (раздел 3) и Российского научного фонда № 19-11-00258 (разделы 1, 2).

меняет математическую модель объекта управления, что соответственно приводит к изменению и гамильтониана.

Альтернативные подходы заключаются в том, чтобы учитывать изменение положения объекта при его движении к терминальной точке [9].

В данной статье предлагается подход на основе многоточечной стабилизации [10]. Способ заключается в решении на первом этапе задачи синтеза системы стабилизации, обеспечивающей устойчивость объекта управления относительно некоторой заданной точки в пространстве состояний. На втором этапе осуществляется поиск оптимального положения этих точек стабилизации, чтобы переключение этих точек через заданный интервал времени привело к оптимальному согласно заданному критерию перемещению объекта. Задача поиска относится к классу задач конечномерной оптимизации.

На практике разработчики почти всегда первоначально делают объект управления устойчивым, а затем ищут управление им. Это скорее всего вызвано тем, что математическая модель объекта управления всегда не точно описывает реальный объект, но в окрестности точки стабилизации ошибки описания объекта нивелируются. Сложность реализации рассматриваемого в работе подхода состоит в том, что на первом этапе необходимо решать задачу общего синтеза управления, которая намного сложнее, чем задача оптимального управления. Для решения задачи синтеза в подавляющем большинстве случаев используются технические методы [12–14], в которых в каналы управления вставляются различные линейные регуляторы, либо аналитические регуляторы [15–20], в которых используются нелинейные стабилизирующие функции для обеспечения устойчивости по теоремам Ляпунова. Все эти методы нельзя назвать численными, они реализуются по-разному в зависимости от правых частей дифференциальных уравнений, описывающих модель объекта управления.

Для решения задачи синтеза управления в настоящей работе применяется численный метод символьной регрессии [21]. Данные методы находят математическое выражение для функции управления в форме специального кода. Для поиска решения на пространстве кодов используется эволюционный, как правило, генетический алгоритм. Методы символьной регрессии отличаются видом кодирования математического выражения. В данной работе

для решения задачи стабилизации используется метод сетевого оператора.

1. Математическая модель объекта

Математические модели квадрокоптеров отличаются друг от друга конструктивными особенностями, уровнем абстракций, например, моделью аэродинамических сил сопротивления и идеализации физических характеристик, упругостью и массой элементов конструкции.

В работе рассматривается симметричный квадрокоптер с четырьмя винтами [22]. Математическая модель квадрокоптера описывается следующей системой из $n = 12$ дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_4 + (x_5 \sin x_1 + x_6 \cos x_1) \sin x_2 / \cos x_2; \\ \dot{x}_2 = (x_5 \sin x_1 + x_6 \cos x_1) / \cos x_2; \\ \dot{x}_3 = (x_5 \sin x_1 + x_6 \cos x_1); \\ \dot{x}_4 = x_5 x_6 (I_2 - I_3) / I_1 + M_1 / I_1; \\ \dot{x}_5 = x_4 x_6 (I_3 - I_1) / I_2 + M_2 / I_2; \\ \dot{x}_6 = x_4 x_5 (I_1 - I_2) / I_3 + M_3 / I_3; \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_7 = x_{10}; \\ \dot{x}_8 = x_{11}; \\ \dot{x}_9 = x_{12}; \\ \dot{x}_{10} = F \sin x_3 \cos x_2 \cos x_1 + \sin x_1 \sin x_2; \\ \dot{x}_{11} = F \cos x_3 \cos x_2 \cos x_1 - g; \\ \dot{x}_{12} = F \sin x_1 \cos x_2 - \cos x_1 \sin x_2 \sin x_3, \end{cases} \quad (2)$$

где система уравнений (1) описывает угловое движение квадрокоптера, а система уравнений (2) описывает пространственное перемещение квадрокоптера; x_1, x_3 — углы поворота вокруг горизонтальных осей; x_2 — угол поворота вокруг вертикальной оси; x_4 и x_6 — угловые скорости вращения вокруг горизонтальных осей; x_5 — угловая скорость вращения вокруг вертикальной оси; x_7, x_9 — горизонтальные оси; x_8 — вертикальная ось; x_{10} — скорость вдоль оси x_7 ; x_{11} — скорость вдоль оси x_8 ; x_{12} — скорость вдоль оси x_9 ; $M_i, i = 1, 2, 3$ — управляющие моменты, создаваемые винтами квадрокоптера вокруг трех осей; F — общая тяга всех четырех винтов квадрокоптера с учетом поправки на массу m ; g — постоянное ускорение свободного падения; $I_i, i = 1, 2, 3$ — моменты инерции квадрокоптера вокруг осей $x_i, i = 1, 2, 3$.

Как видим из уравнений (1)–(2), движение квадрокоптера можно декомпозировать

на угловое и пространственное. Перемещение квадрокоптера в пространстве осуществляется за счет наклона силы тяги. Наклон квадрокоптера осуществляется управляющими моментами M_1 и M_3 . Реальное управление квадрокоптером осуществляется силами тяги каждого из четырех винтов. Связь между управляющими моментами и общей силой тяги с силами тяги отдельных винтов квадрокоптера определяется следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} F &= u_1 + u_2 + u_3 + u_4, \quad M_1 = u_2 + u_3 - u_1 - u_4, \\ M_2 &= u_1 + u_3 - u_2 + u_4, \quad M_3 = u_1 + u_2 - u_3 + u_4. \end{aligned} \quad (3)$$

На силы тяги отдельных винтов наложены ограничения, которые являются в контексте постановки задачи оптимального управления ограничениями на управление:

$$0 \leq u_i \leq u^+, \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (4)$$

Система координат вертолета с четырьмя винтами показана на рис. 1 (см. третью сторону обложки).

Переменные просто нумеруются без ссылки на их физический смысл, поскольку вычислительный подход, который используется для решения задачи синтезированного оптимального управления, является автоматическим, и физический смысл переменных для компьютера не имеет значения.

2. Синтез системы стабилизации методом сетевого оператора

Согласно методу многоточечной стабилизации [9] первоначально решаем задачу синтеза системы стабилизации.

Для того чтобы решить задачу стабилизации квадрокоптера в точке двенадцатимерного пространства состояний, первоначально строим систему угловой стабилизации. Для решения этой задачи используем систему из шести уравнений (1). В результате решения задачи синтеза системы стабилизации углового движения квадрокоптера получим синтезирующие функции управления

$$\begin{aligned} M_1 &= g_1(x_1^* - x_1, x_2^* - x_2, x_3^* - x_3, x_4^* - x_4, x_5^* - x_5, x_6^* - x_6); \\ M_2 &= g_2(x_1^* - x_1, x_2^* - x_2, x_3^* - x_3, x_4^* - x_4, x_5^* - x_5, x_6^* - x_6); \\ M_3 &= g_3(x_1^* - x_1, x_2^* - x_2, x_3^* - x_3, x_4^* - x_4, x_5^* - x_5, x_6^* - x_6), \end{aligned} \quad (5)$$

где x_1^*, x_2^*, x_3^* — заданные углы наклона квадрокоптера; x_4^*, x_5^*, x_6^* — заданные скорости; $g_i(\mathbf{x}^a, \tilde{\mathbf{x}}^a)$ — компонента векторной синтезирующей функции управления системы угловой стабилизации, $i = 1, 2, 3$:

$$\begin{aligned} \mathbf{g}(\mathbf{x}^a, \tilde{\mathbf{x}}^a) &= [g_1(\mathbf{x}^a, \tilde{\mathbf{x}}^a) \ g_2(\mathbf{x}^a, \tilde{\mathbf{x}}^a) \ g_3(\mathbf{x}^a, \tilde{\mathbf{x}}^a)]^T; \\ \mathbf{x}^a &= [x_1 \dots x_6]^T; \quad \tilde{\mathbf{x}}^a = [x_1^* \ x_2^* \ x_3^* \ 0 \ 0 \ 0]^T. \end{aligned} \quad (6)$$

На втором этапе решаем задачу пространственной стабилизации, где используем все двенадцать уравнений (1), (2). Здесь в качестве управления рассматриваем заданные углы стабилизации и общую тягу всех винтов

$$\begin{aligned} x_1^* &= h_1(x_7^* - x_7, x_8^* - x_8, x_9^* - x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}); \\ x_2^* &= h_2(x_7^* - x_7, x_8^* - x_8, x_9^* - x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}), \\ x_3^* &= h_3(x_7^* - x_7, x_8^* - x_8, x_9^* - x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}); \\ F &= h_4(x_7^* - x_7, x_8^* - x_8, x_9^* - x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}), \end{aligned} \quad (7)$$

где x_7^*, x_8^*, x_9^* — заданные координаты пространственного положения квадрокоптера; $h_i(\mathbf{x}^s, \tilde{\mathbf{x}}^s)$ — компонента векторной синтезирующей функции управления системы пространственной стабилизации, $i = 1, 2, 3, 4$:

$$\begin{aligned} \mathbf{h}(\mathbf{x}^s, \tilde{\mathbf{x}}^s) &= [h_1(\mathbf{x}^s, \tilde{\mathbf{x}}^s) \ h_2(\mathbf{x}^s, \tilde{\mathbf{x}}^s) \ h_3(\mathbf{x}^s, \tilde{\mathbf{x}}^s)]^T; \\ \mathbf{x}^s &= [x_7 \dots x_{12}]^T; \quad \tilde{\mathbf{x}}^s = [x_7^* \ x_8^* \ x_9^* \ 0 \ 0 \ 0]^T. \end{aligned} \quad (8)$$

Для решения задач угловой и пространственной стабилизации квадрокоптера используем численный метод сетевого оператора. Метод сетевого оператора — один из современных методов символьной регрессии, разработанный специально для решения задачи общего синтеза управления. Метод сетевого оператора кодирует математическое выражение как композицию элементарных функций в виде ориентированного графа. Подробнее с методом сетевого оператора можно ознакомиться в монографии [21].

При синтезе системы угловой стабилизации были заданы следующие начальные значения:

$$\begin{aligned} X_0 &= \{\mathbf{x}^{a,0,1} = [-0,2 \ -0,2 \ -0,2 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{x}^{a,0,2} &= [-0,2 \ -0,2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\ \mathbf{x}^{a,0,3} &= [-0,2 \ -0,2 \ 0,2 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{x}^{a,0,4} &= [-0,2 \ 0 \ -0,2 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\
\mathbf{x}^{a,0,5} &= [-0,2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\
\mathbf{x}^{a,0,6} &= [-0,2 \ 0 \ 0,2 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\
\mathbf{x}^{a,0,7} &= [-0,2 \ 0,2 \ -0,2 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\
\mathbf{x}^{a,0,8} &= [-0,2 \ 0,2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\
\mathbf{x}^{a,0,9} &= [-0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\
\mathbf{x}^{a,0,10} &= [0 \ -0,2 \ -0,2 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\
\mathbf{x}^{a,0,11} &= [0 \ -0,2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\
\mathbf{x}^{a,0,12} &= [0 \ -0,2 \ 0,2 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\
\mathbf{x}^{a,0,13} &= [0 \ 0 \ -0,2 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\
\mathbf{x}^{a,0,14} &= [0 \ 0 \ 0,2 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\
\mathbf{x}^{a,0,15} &= [0 \ 0,2 \ -0,2 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\
\mathbf{x}^{a,0,16} &= [0 \ 0,2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\
\mathbf{x}^{a,0,17} &= [0 \ 0,2 \ 0,2 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\
\mathbf{x}^{a,0,18} &= [0,2 \ -0,2 \ -0,2 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\
\mathbf{x}^{a,0,19} &= [0,2 \ -0,2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\
\mathbf{x}^{a,0,20} &= [0,2 \ -0,2 \ 0,2 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\
\mathbf{x}^{a,0,21} &= [0,2 \ 0 \ -0,2 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\
\mathbf{x}^{a,0,22} &= [0,2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\
\mathbf{x}^{a,0,23} &= [0,2 \ 0 \ 0,2 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\
\mathbf{x}^{a,0,24} &= [0,2 \ 0,2 \ -0,2 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\
\mathbf{x}^{a,0,25} &= [0,2 \ 0,2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\
\mathbf{x}^{a,0,26} &= [0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0 \ 0 \ 0]^T.
\end{aligned}$$

Было задано терминальное условие $\mathbf{x}_{a,f} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$.

Ограничения на управления в задаче синтеза системы угловой стабилизации имели следующие значения:

$$-2 = M_i^- \leq M_i \leq M_i^+ = 2, \quad i = 1, 2, 3.$$

Критерий качества имел следующий вид:

$$J_a = \sum_{i=1}^{26} \left(t_{f,i}^{(a)} + p_a \sqrt{\sum_{j=1}^6 (x_j^{a,f} - x_j^a(t_{f,i}^{(a)}, \mathbf{x}^{a,0,i}))^2} \right), \quad (9)$$

где $p_a = 1$, значение $t_{f,i}^{(a)}$ определялось из формулы

$$t_{f,i}^{(a)} = \begin{cases} t, & \text{если } t < t^a \text{ и } \mathbf{x}^a(t, \mathbf{x}^{a,0,k}) - \mathbf{x}^{a,f} \leq \varepsilon_a; \\ t^{a+} & \text{иначе;} \end{cases}$$

$t^{a+} = 1,5$ с, $\varepsilon_a = 0,01$ — заданные положительные величины;

$$\mathbf{x}^a - \mathbf{x}^{a,f} = \sqrt{\sum_{j=1}^6 (x_j - x_j^{a,f})^2}.$$

При поиске решения параметры модели имели следующие значения: $I_1 = 1,5$, $I_2 = 1$, $I_3 = 1,5$, $g = 9,8067$.

Сетевой оператор имел следующие значения параметров: размерность матрицы сетевого оператора 32×32 , число функций с одним аргументом $k_w = 20$, число функций с двумя аргументами $k_v = 2$, число возможных решений в начальном множестве (популяции) $H = 1024$, число поколений $P = 128$, максимальное число скрещиваний в одном поколении $R = 128$, число поколений между сменой базисного решения $k_E = 32$, число малых вариаций в одном возможном решении $d = 8$, вероятность мутации $p_\mu = 0,7$, число искоемых параметров $p = 6$, число битов кода Грея для поиска параметров 16, для целой части — 4, для дробной части — 12.

Базисное решение при синтезе системы угловой стабилизации имело вид

$$M_j^{(0)} = \sum_{i=1}^6 q_i (x_i^{a,f} - x_i^a), \quad j = 1, 2, 3. \quad (10)$$

Расчеты проводили на персональном компьютере 2,8 ГГц, с процессором Core i7. Время счета для одного запуска составляло около 40 мин. В процессе поиска функционал (9) вычислялся 1 035 720 раз.

В результате решения задачи синтеза системы угловой стабилизации методом сетевого оператора была получена следующая синтезирующая функция:

$$M_i = \begin{cases} M_i^-, & \text{если } \tilde{M}_i < M_i^-; \\ M_i^+, & \text{если } \tilde{M}_i > M_i^+; \\ \tilde{M}_i^0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad (11)$$

$$i = 1, 2, 3,$$

где математические выражения для синтезирующей функции имеют вид

$$\begin{aligned}
\tilde{M}_1 &= A_1^{-1} + \sqrt[3]{A_1} + \operatorname{sgn}(x_6^* - x_6) \times \\
&\times \ln(|q_6(x_6^* - x_6)| + 1) + q_2(x_2^* - x_2) + \\
q_1(x_1^* - x_1) &+ \operatorname{sgn}(x_4^* - x_4) \sqrt{|q_4(x_4^* - x_4)|} + \\
&+ q_4^3(x_4^* - x_4)^3;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tilde{M}_2 &= \operatorname{sgn}(\operatorname{sgn}(A_2) \exp(|A_2| - 1) \times \\ &\quad \times \sqrt{|\operatorname{sgn}(A_2) \exp(|A_2| - 1)|}); \\ \tilde{M}_3 &= \tanh(0,5A_3) + q_3(x_3^* - x_3) + \operatorname{sgn}(x_5^* - x_5) \times \\ &\quad \times \ln(|q_5(x_5^* - x_5)| + 1) - x_3^* + x_3 + \\ &\quad + \sqrt[3]{A_3} + q_6(x_6^* - x_6) + q_2(x_2^* - x_2); \\ A_1 &= q_4(x_4^* - x_4) + q_1(x_1^* - x_1) + \\ &\quad + (x_4^* - x_4)^3 + \sqrt[3]{q_1(x_1^* - x_1)}; \\ A_2 &= B + (q_3 + 1)(x_3^* - x_3); \\ A_3 &= (B + q_3(x_3^* - x_3))^3 + q_6(x_6^* - x_6) + q_2(x_2^* - x_2); \\ B &= \operatorname{sgn}(x_5^* - x_5) \ln(|q_5(x_5^* - x_5)| + 1); \\ \tanh(\alpha) &= \frac{1 - \exp(-2\alpha)}{1 + \exp(-2\alpha)},\end{aligned}$$

где $q_1 = 12,224$, $q_2 = 14,197$, $q_3 = 13,661$, $q_4 = 4,361$, $q_5 = 9,989$, $q_6 = 4,114$.

На рис. 2 показаны результаты моделирования синтезированной системы угловой стабилизации для восьми начальных значений

$$\begin{aligned}\mathbf{x}^{a,0,1} &= [-0,2 \ -0,2 \ -0,2 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\ \mathbf{x}^{a,0,3} &= [-0,2 \ -0,2 \ 0,2 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\ \mathbf{x}^{a,0,7} &= [-0,2 \ 0,2 \ -0,2 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\ \mathbf{x}^{a,0,9} &= [-0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\ \mathbf{x}^{a,0,18} &= [0,2 \ -0,2 \ -0,2 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\ \mathbf{x}^{a,0,20} &= [0,2 \ -0,2 \ 0,2 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\ \mathbf{x}^{a,0,24} &= [0,2 \ 0,2 \ -0,2 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\ \mathbf{x}^{a,0,26} &= [0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0 \ 0 \ 0]^T.\end{aligned}\quad (12)$$

На рис. 3, 4 приведены графики управлений для системы угловой стабилизации для одного начального состояния $\mathbf{x}^{a,0,1}$.

На втором этапе решалась задача синтеза системы пространственной стабилизации. Здесь рассматривалась стабилизация квадрокоптера относительно точки в шестимерном подпространстве $\{x_7, \dots, x_{12}\}$. Управление для системы стабилизации включало четыре компоненты $\hat{\mathbf{u}} = [x_1^* \ x_2^* \ x_3^* \ F]^T$.

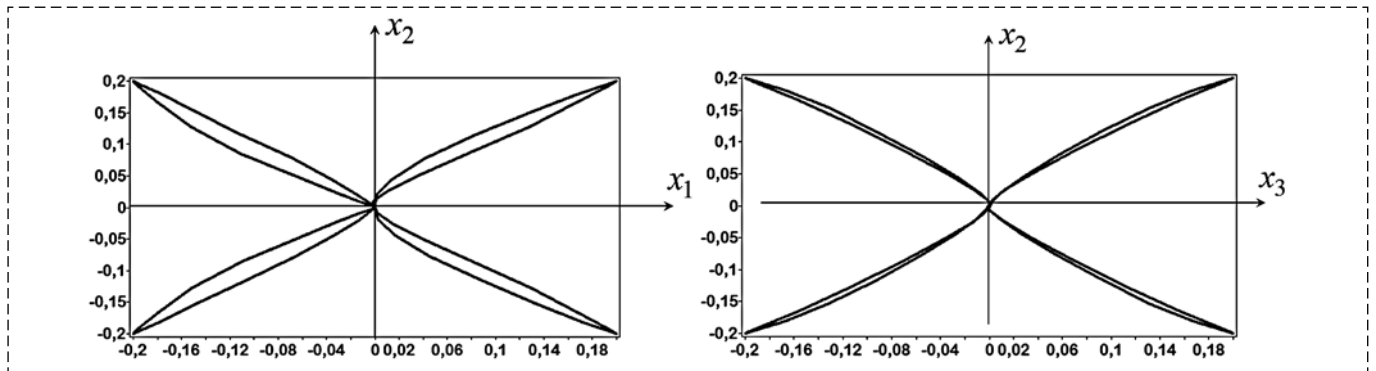


Рис. 2. Траектории углового движения квадрокоптера на $\{x_1, x_2\}$ и $\{x_2, x_3\}$
Fig. 2. Quadcopter angular motion trajectories on subspaces $\{x_1, x_2\}$ and $\{x_2, x_3\}$

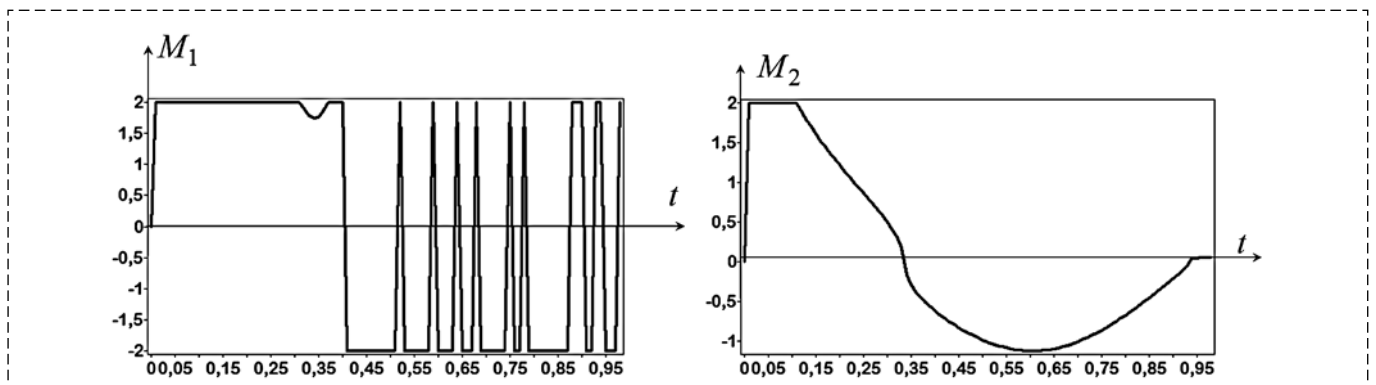


Рис. 3. Управление M_1 и M_2 системы угловой стабилизации
Fig. 3. Angle stabilization control M_1 and M_2

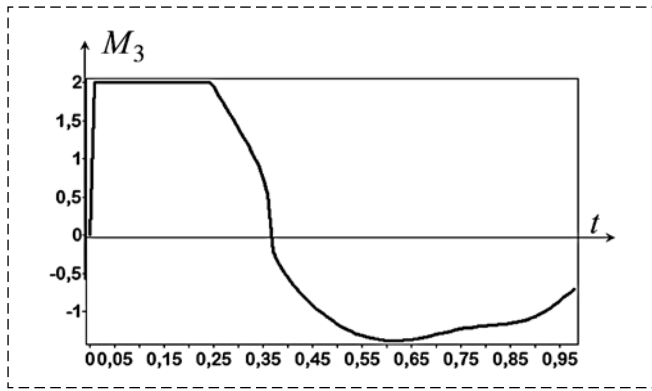


Рис. 4. Управление M_3 системы угловой стабилизации
Fig. 4. Angle stabilization control M_3

Множество точек начальных значений включало восемь элементов

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_0 = \{ & \mathbf{x}^{0,1} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -0,5 \ -0,5 \ -0,5 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\ & \mathbf{x}^{0,2} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -0,5 \ -0,5 \ 0,5 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\ & \mathbf{x}^{0,3} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -0,5 \ 0,5 \ -0,5 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\ & \mathbf{x}^{0,4} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -0,5 \ 0,5 \ 0,5 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\ & \mathbf{x}^{0,5} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0,5 \ -0,5 \ -0,5 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\ & \mathbf{x}^{0,6} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0,5 \ -0,5 \ 0,5 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\ & \mathbf{x}^{0,7} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0,5 \ 0,5 \ -0,5 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \\ & \mathbf{x}^{0,8} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0,5 \ 0,5 \ 0,5 \ 0 \ 0 \ 0]^T \}. \end{aligned}$$

Ограничения на управление были приняты следующими:

$$\begin{aligned} -\pi/4 &= x_1^- \leq x_1^* \leq x_1^+ = \pi/4; \\ -\pi/4 &= x_2^- \leq x_2^* \leq x_2^+ = \pi/4; \\ -\pi/4 &= x_3^- \leq x_3^* \leq x_3^+ = \pi/4; \\ 0 &= F^- \leq F \leq F^+ = 12. \end{aligned}$$

Терминальное условие:

$$\mathbf{x}^f = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T.$$

При синтезе функционал имел следующий вид:

$$J_s = \sum_{i=1}^8 \left(t_{f,i} + p_s \sqrt{\sum_{j=1}^{12} (x_j^f - x_j(t_{f,i}, \mathbf{x}^{0,i}))^2} \right), \quad (13)$$

где $p_s = 2,5$, $t_{f,i}$ определялось по формуле

$$t_{f,i} = \begin{cases} t, & \text{если } t < t^+ \text{ и } \mathbf{x}(t, \mathbf{x}^{0,i}) - \mathbf{x}^f \leq \varepsilon_s, \\ t^+ & \text{— иначе} \end{cases}$$

со значениями параметров $\varepsilon_s = 0,05$, $t^+ = 2$ с,

$$\mathbf{x} - \mathbf{x}^f = \sqrt{\sum_{j=1}^{12} (x_j - x_j^f)^2}.$$

Базисное решение имело следующий вид:

$$\begin{aligned} x_1^* &= q_{11}(x_9^* - x_9) - q_{12}; \\ x_2^* &= q_7(x_7^* - x_7) - q_8 x_{10} + q_9(x_8^* - x_8) - \\ &\quad - q_{10} x_{11} + q_{11}(x_9^* - x_9) - q_{12} x_{12}; \\ x_1^* &= q_7(x_7^* - x_7) - q_8 x_{10}; \\ F &= q_9(x_8^* - x_8) - q_{10} x_{11}. \end{aligned}$$

В результате было получено следующее решение:

$$\begin{aligned} x_i^* &= \begin{cases} x_i^-, & \text{если } \tilde{x}_i < x_i^-; \\ x_i^+, & \text{если } \tilde{x}_i > x_i^+; \\ \tilde{x}_i & \text{— иначе;} \end{cases} \\ F &= \begin{cases} F^-, & \text{если } \tilde{F} < F^-; \\ F^+, & \text{если } \tilde{F} > F^+; \\ \tilde{F} & \text{— иначе,} \end{cases} \quad (14) \\ i &= 1, 2, 3, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{x}_1^* &= C_1 D_1 \sqrt[3]{C_1} \ln(|q_9(x_9^* - x_9) \cos(x_{11})|); \\ \tilde{x}_2^* &= \sqrt[3]{\tilde{x}_1^*} + 2 \arctan(C_2) - q_{10}^3 x_{10}^9 + D_2 - \\ &\quad - q_{11} x_{11} q_8^2 (x_8^f - x_8)^2 + \arctan(C_1 D_1) + \\ &\quad + q_8 (x_8^f - x_8) + \tanh(-0,5 x_{12}) - \\ &\quad - q_7 (x_7^f - x_7) + \arctan(-q_{10} x_{10}^3 + q_7 (x_7^f - x_7)) + \\ &\quad + \operatorname{sgn}(C_3) (\exp(|C_3|) - 1) + \\ &\quad + \operatorname{sgn}(q_{10} x_{10}^3 + q_7 (x_7^f - x_7)) \times \\ &\quad \times \sqrt{|q_{10} x_{10}^3 + q_7 (x_7^f - x_7)|} + \mu(C_1 D_1); \\ \tilde{x}_3^* &= \operatorname{sgn}(x_1) \ln(|\tilde{x}_1^*| + 1) + \sqrt[3]{C_3} + \arctan(C_2) - \\ &\quad - q_{10}^3 x_{10}^9 - \tilde{x}_1^* + (-q_{10} x_{10}^3 + q_7 (x_7^f - x_7))^3; \\ \tilde{F} &= \operatorname{sgn}(\tilde{x}_3^*) + \operatorname{sgn}(\tilde{x}_2^*) \exp(|\tilde{x}_2^*| - 1) + \\ &\quad + \operatorname{sgn}(\tilde{x}_1^*) \ln(|\tilde{x}_1^*| + 1) + C_2^2 + \tanh(0,5 C_3) + D_1^2 + \\ &\quad + \tanh(0,5 C_3) + (-q_{10} x_{10}^3 + q_7 (x_7^f - x_7))^2; \\ C_1 &= q_{12} x_{12} + \sqrt[3]{q_{10}} + \arctan(q_9) + \cos(x_7^f - x_7); \\ D_1 &= q_9 (x_9^f - x_9) \cos(x_{11}) \exp(-q_{12}); \end{aligned}$$

$$D_2 = 2(\arctan(-q_{10}x_{10}^3 + q_7(x_7^f - x_7)) + \\ + q_{11}x_{11}q_8^2(x_8^f - x_8)^2 + q_8^2(x_8^f - x_8) - 1 - \\ - \operatorname{sgn}(x_{11})\exp(-|q_{11}x_{11}q_8^2(x_8^f - x_8)|) + \\ + \exp(q_{10}) + (-q_{10}x_{10}^3 + q_7(x_7^f - x_7))^3 - \\ - q_7(x_7^f - x_7));$$

$$C_2 = \operatorname{sgn}(-q_{10}x_{10}^3 + q_7(x_7^f - x_7)) \times \\ \times (\exp(-|q_{10}x_{10}^3 + q_7(x_7^f - x_7)|) - 1 - \\ - \operatorname{sgn}(x_{10})\sqrt{|q_{10}x_{10}^3|} + \mu(q_7(x_7^f - x_7)));$$

$$C_3 = \arctan(-q_{10}x_{10}^3 + q_7(x_7^f - x_7)) - \\ - q_7(x_7^f - x_7) - q_{11}x_{11}q_8^2(x_8^f - x_8)^2 + \\ + q_8(x_8^f - x_8);$$

$$\mu(\alpha) = \begin{cases} \operatorname{sgn}(\alpha), & \text{если } |\alpha| > 1; \\ \alpha & \text{иначе;} \end{cases}$$

$$q_7 = 0,115, q_8 = 3,371, q_9 = 3,076, q_{10} = 0,144, \\ q_{11} = 3,131, q_{12} = 4,515.$$

При поиске решения было выполнено 1 189 440 вычислений критерия качества (12).

На рис. 5 приведены траектории движения квадрокоптера с системами угловой и пространственной стабилизации из восьми начальных условий (12). На рис. 6, 7 приведены графики управлений пространственным движением квадрокоптера для одного начального условия $x^{0,1}$.

Как видно из графиков, приведенных на рис. 2—7, синтезированные методом сетевого оператора в автоматическом режиме системы угловой и пространственной стабилизации достаточно качественно стабилизируют квадрокоптер в точке пространства состояний. Сложные математические выражения, полученные в результате автоматического синтеза методом сетевого оператора объясняются компьютерным способом нахождения этих выражений. Скорее всего, они являются избыточными и допускают сокращения. Сложности для вычислений на борту квадрокоптера данные выражения не представляют, так как при вычислении будет использоваться их код в форме сетевого оператора.

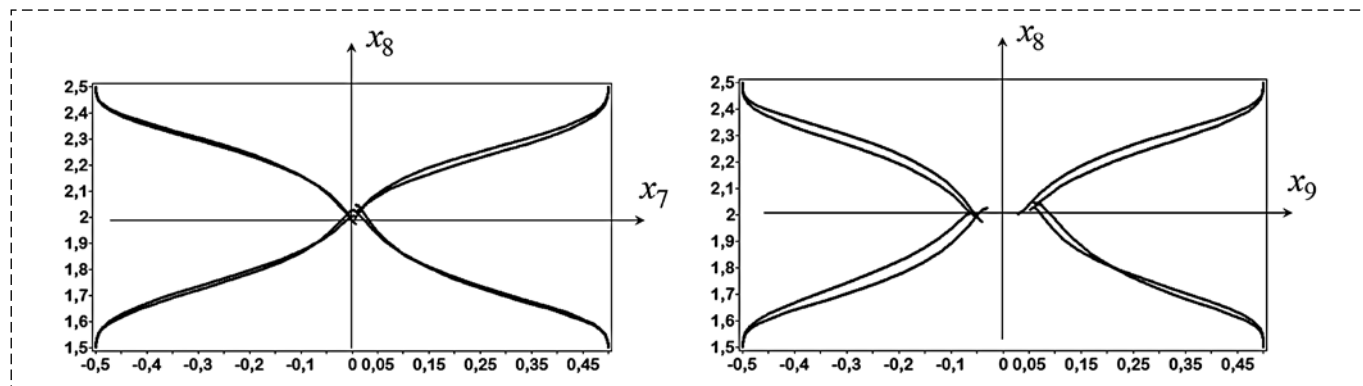


Рис. 5. Траектории движения квадрокоптера на плоскостях $\{x_7, x_8\}$ и $\{x_9, x_8\}$

Fig. 5. Trajectories of the quadcopter on the planes $\{x_7, x_8\}$ and $\{x_9, x_8\}$

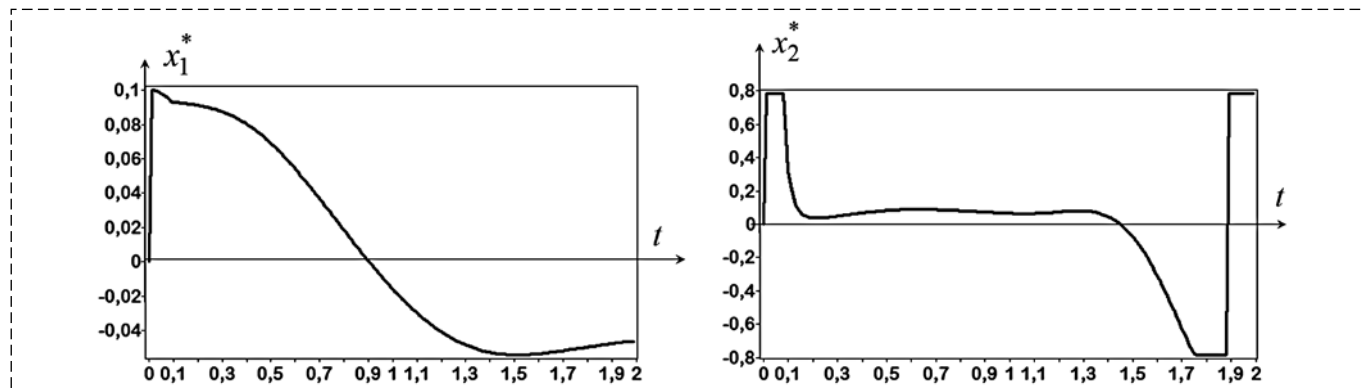


Рис. 6. Компоненты управления x_1^* и x_2^*

Fig. 6. Control components x_1^* and x_2^*

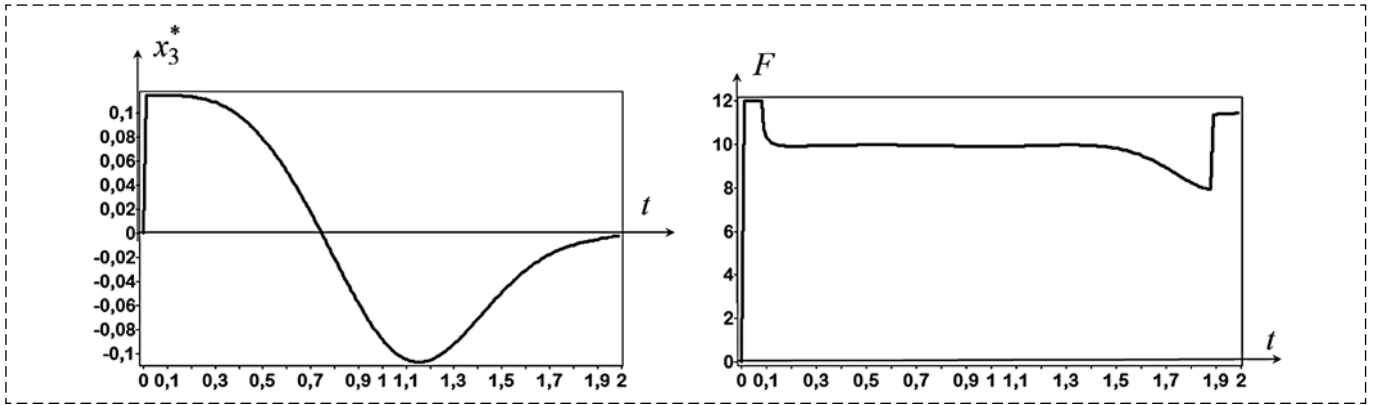


Рис. 7. Компоненты управления x_3^* и F
 Fig. 7. Control components x_3^* and F

3. Поиск оптимального положения точек стабилизации

Найденные синтезированные функции управления зависят от разности между координатами точки стабилизации и текущими координатами объекта управления. Далее мы находим координаты других точек стабилизации как искомые параметры оптимального управления. Координаты точек стабилизации подаются в синтезированные функции управления через заданные интервалы времени, чтобы обеспечить движение объекта управления в терминальное состояние с оптимальным значением критерия качества.

Рассмотрим решение задачи перемещения квадрокоптера из начального состояния в терминальное с учетом фазовых ограничений.

Пусть задана математическая модель квадрокоптера (1), (2).

Заданы начальные условия

$$x_i(0) = x_i^0, \quad i = 1, \dots, 12. \quad (15)$$

Заданы фазовые ограничения

$$\varphi_i(\mathbf{x}) = r_i - \sqrt{(x_{i,7} - x_7)^2 + (x_{i,9} - x_9)^2} \leq 0, \quad (16)$$

$$i = 1, \dots, s,$$

где s — число фазовых ограничений.

Заданы терминальные условия

$$\sqrt{\sum_{j=1}^{12} (x_i(t_f) - x_i^f)^2} \leq \varepsilon, \quad (17)$$

где x_i^f — заданные значения; t_f — ограниченное, но неизвестное время окончания процесса управления, которое также определяется достижением терминальных условий (17):

$$t_{f,i} = \begin{cases} t, & \text{если } t < t^+ \text{ и } \sqrt{\sum_{j=1}^{12} (x_i(t_f) - x_i^f)^2} \leq \varepsilon; \\ t^+ & \text{— иначе,} \end{cases} \quad (18)$$

t^+ — заданное ограничение на время управления; ε — заданная точность достижения терминальных условий (17).

Задан критерий качества управления

$$J = t_f \rightarrow \min. \quad (19)$$

Задача синтеза системы стабилизации была решена на предыдущем этапе методом сетевого оператора и получены синтезирующие функции управления (11), (13).

На данном этапе находим целевые точки $\mathbf{x}^* = \{\mathbf{x}^{*,1}, \dots, \mathbf{x}^{*,K}\}$, чтобы решить задачу оптимального управления с помощью переключения этих точек через определенный интервал времени Δt .

При решении задачи оптимального управления включим условия попадания в терминальное состояние (17) и условие выполнения фазовых ограничений (16) в критерий качества (19):

$$J_1 = t_f + a_1 \int_0^{t_f} \sum_{i=1}^s \vartheta(\varphi_i(\mathbf{x})) dt +$$

$$+ \sqrt{\sum_{j=7}^9 a_{j-5} (x_j(t_f) - x_j^f)^2} \rightarrow \min,$$

где $a_i, i = 1, 2, 3, 4$, — весовые коэффициенты;

$$\vartheta(\alpha) = \begin{cases} 1, & \text{если } \alpha > 0; \\ 0 & \text{— иначе.} \end{cases}$$

Для определения координат целевых точек используем эволюционный алгоритм роя частиц (particle swarm optimization) — PSO-алго-

ритм [23, 24], поскольку целевая функция в данном случае скорее всего будет невыпуклой и неунимодальной в пространстве искомых параметров.

В вычислительном эксперименте были заданы следующие значения: начальные условия $x_1(0) = 0, x_2(0) = 0, x_3(0) = 0, x_4(0) = 0, x_5(0) = 0, x_6(0) = 0, x_7(0) = 0, x_8(0) = 2, x_9(0) = 0, x_{10}(0) = 0, x_{11}(0) = 0, x_{12}(0) = 0$; терминальные условия $x_1^f = 0, x_2^f = 0, x_3^f = 0, x_4^f = 0, x_5^f = 0, x_6^f = 0, x_7^f = 10, x_8^f = 2, x_9^f = 10, x_{10}^f = 0, x_{11}^f = 0, x_{12}^f = 0$; другие параметры: $t^+ = 3,5, \varepsilon = 0,01, a_1 = a_3 = 2,5, a_2 = a_4 = 2$; число фазовых ограничений $s = 4$; параметры ограничений $r_1 = 1,5, r_2 = 1,5, r_3 = 2, r_4 = 2, x_{1,7} = 2,5, x_{1,9} = 2,5, x_{2,7} = 7,5, x_{2,9} = 7,5, x_{3,7} = 2, x_{3,9} = 8, x_{4,7} = 8, x_{4,9} = 2$; ограничения на управление $M_i^- = -2, M_i^+ = 2, i = 1, 2, 3, F^- = 0, F^+ = 12$.

В результате были получены следующие координаты целевых точек $\{x_7, x_8, x_9\}$:

$$\begin{aligned} x_7^{*,1} &= 0,891, & x_8^{*,1} &= 3,799, & x_9^{*,1} &= -0,241, \\ x_7^{*,2} &= 4,958, & x_8^{*,2} &= 2,532, & x_9^{*,2} &= 1,362, \\ x_7^{*,3} &= 8,686, & x_8^{*,3} &= 2,615, & x_9^{*,3} &= 11,822, \\ x_7^{*,4} &= 8,454, & x_8^{*,4} &= 3,402, & x_9^{*,4} &= 1,391. \end{aligned}$$

Точки переключались через интервал $\Delta t = 0,7$ с. Последняя точка совпадала с терминальной точкой $x_7^f = 10, x_8^f = 2, x_9^f = 10$.

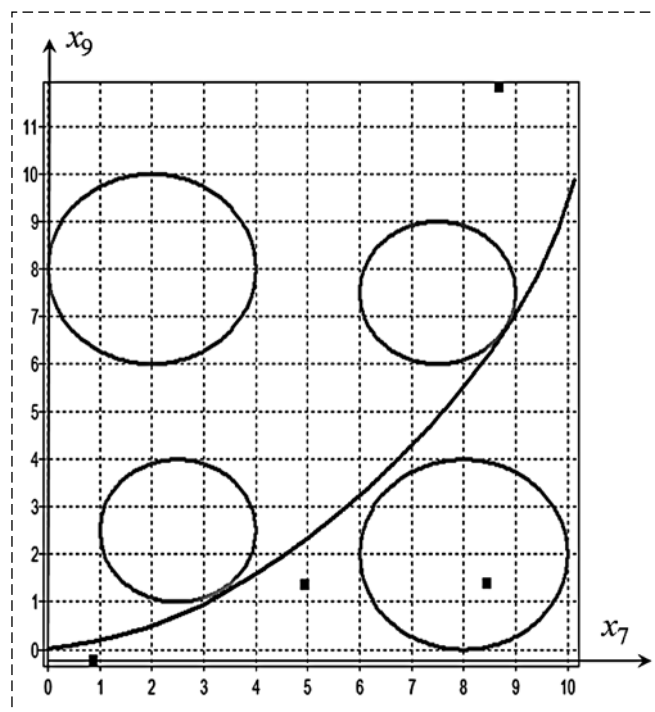


Рис. 8. Оптимальная траектория движения квадрокоптера
Fig. 8. The optimal trajectory of the quadcopter

Оптимальная траектория движения квадрокоптера на плоскости приведена на рис. 8, где окружности изображают фазовые ограничения, маленькие черные квадраты — найденные целевые точки. Как видим из рис. 8, квадрокоптер достиг терминального состояния, выполнив условия фазовых ограничений, по достаточно гладкой траектории.

Заключение

Рассмотрена задача оптимального управления квадрокоптером с фазовыми ограничениями. Предложен численный подход к решению, который заключается в том, что на первом этапе реализуется численный синтез системы стабилизации объекта. Далее оптимальное управление реализуется за счет оптимального расположения точек стабилизации. Результаты вычислительного эксперимента показали эффективность предложенного подхода.

Список литературы

1. Табак Д., Куо Б. Оптимальное управление и математическое программирование. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1975. 280 с.
2. Федоренко Р. П. Приближенное решение задач оптимального управления. Сер. Математическая библиотека. М.: Наука, Главн. ред. физ.-мат. лит., 1982. 432 с.
3. Квасов Д. Е., Сергеев Я. Д. Методы липшицевой глобальной оптимизации в задачах управления // Автоматика и телемеханика. 2013. № 9. С. 3—19.
4. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, Глав. ред. физ.-мат. лит., 1983. 392 с.
5. Arutyunov A., Karamzin D., Pereira F. A nondegenerate maximum principle for the optimal control problem with state constraints // SIAM J. Control Optim. 2005. V. 43, N. 5. P. 1812—1843.
6. Милютин А. А., Дмитрук А. В., Осмоловский Н. П. Принцип максимума в оптимальном управлении. М.: Издательство МГУ, 168 с.
7. Гамкрелидзе Р. В. Оптимальные процессы управления при ограниченных фазовых координатах // Известия АН СССР. Серия математическая. 1960. № 24. С. 315—356.
8. Дивеев А. И. Условия отсутствия свойств унимодальности функционала в задаче оптимального управления с фазовыми ограничениями // Cloud of science. 2018. N. 2. P. 268—285.
9. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Методы "гибких" траекторий в задачах терминального управления вертикальными маневрами летательных аппаратов // Проблемы управления сложными динамическими объектами авиационной и космической техники. Гл. 2 / Под ред. С. Н. Васильева. М.: Машиностроение, 2015. С. 51—110.
10. Дивеев А. И., Шмально Е. Ю. Метод синтезированного оптимального управления для группы роботов // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 4 (24). С. 25—32.
11. Гэн К., Чулин Н. А. Алгоритмы стабилизации для автоматического управления траекторным движением квадрокоптера // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2015. № 5. С. 218—235.

12. **Зенкевич С. Л., Галустьян Н. К.** Разработка математической модели и синтез алгоритма угловой стабилизации движения квадрокоптера. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 3. С. 27–32.

13. **Зенкевич С. Л., Галустьян Н. К.** Синтез и апробация алгоритма управления движением квадрокоптера по траектории. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 8. С. 530–535.

14. **Cutler M., How J. P.** Actuator Constrained Trajectory Generation and Control for Variable-Pitch Quadrotors // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference (GNC). Minneapolis, Minnesota, August 2012.

15. **Афанасьев В. Н.** Оптимальные системы управления. М.: Издательство РУДН, 2007. 260 с.

16. **Колесников А. А.** Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. М.: КомКнига, 2006. 240 с.

17. **Колесников А. А., Колесников А. А., Кузьменко А. А.** Методы АКАР и бэкстеппинг в задачах синтеза нелинейных систем управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 7. С. 435–445.

18. **Халил Х. К.** Нелинейные системы. Серия Бестселлеры нелинейной науки. М.—Ижевск: РХД, 2009. 832 с.

19. **Krstic M., Kanellakopoulos M., Kokotovic P. V.** Adaptive nonlinear control without overparametrization // Systems & Control Letters. 1992. Vol. 19, Iss. 3. P. 177–185.

20. **Кунцевич В. М., Лычак М. М.** Синтез систем автоматического управления с помощью функций Ляпунова. М.: Наука, 1977, 400 с.

21. **Дивеев А. И.** Численные методы решения задачи синтеза управления. М.: РУДН, 2019. 192 с.

22. **Гурьянов А. Е.** Моделирование управления квадрокоптером // Инженерный вестник. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014. С. 522–534.

23. **Kennedy J., Eberhart R.** Particle swarm optimization // Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia. 1995. Vol. IV. P. 1942–1948.

24. **Дивеев А. И., Константинов С. В.** Исследование практической сходимости эволюционных алгоритмов оптимального программного управления колесным роботом // Известия РАН. Теория и системы управления. 2018. № 4. С. 80–106.

Quadrocopter Control by Network Operator Method Based on Multi-Point Stabilization

A. I. Diveev, aidiveev@mail.ru, **E. Yu. Shmalko**, e.shmalko@gmail.com,
Federal Research Center "Computer Science and Control" of RAS, 119333, Moscow, Russian Federation,
O. Hussein, eng.nano.oubai@gmail.com
RUDN University, 117198, Moscow, Russian Federation

*Corresponding author: Shmalko E. Yu., PhD, Senior Researcher,
Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences,
119333, Moscow, Russian Federation, e-mail: e.shmalko@gmail.com*

Accepted on March 18, 2020

Abstract

The paper presents a solution to the problem of optimal control of a quadrocopter under phase constraints by the numerical method of a network operator based on multi-point stabilization. According to this approach, the task of control system synthesis is initially solved. As a result, the quadrocopter is stabilized with respect to a certain point in the state space. At the second stage, a sequence of stabilization points is searched in the state space such that switching the stabilization points at fixed times ensures the movement of the quadrocopter from the initial state to the terminal state with an optimal value of the quality criterion taking into account phase constraints. To solve the problem of stabilization system synthesis, the network operator method is used. The method is numerical and, unlike the well-known analytical methods, allows to synthesize a control system automatically without a specific analysis of the right parts of the model. The method allows to find the structure and parameters of a mathematical expression in the encoded form using the genetic algorithm. The network operator code is an integer upper-triangular matrix. At the stage of solving the synthesis problem, the mathematical model of quadrocopter motion is decomposed into angular and spatial motions in order to separate control components for angular and spatial motions, respectively. The synthesized stabilization system consists of two subsystems connected in series for spatial and angular motion. As controls for spatial motion, moments around the axes and the total thrust of all quadrocopter propellers were used. And the inputs for the angular motion stabilization system are the desired angles of inclination of the quadrocopter. The stabilization problem is considered as a general synthesis task for a control system. Using the network operator method, one control function is searched that provides stabilization of the object at a given point in the considered state space from the set of initial conditions. At the stage of the search for equilibrium points, the evolutionary particle swarm algorithm is used. A numerical example of solving the problem of optimal control of a quadrocopter with four phase constraints is given.

Keywords: optimal control, stabilization system synthesis, network operator method, evolutionary algorithm, quadrocopter, phase constraints

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project № 18-29-03061-mk (section 3), and Russian Science Foundation, project № 19-11-00258 (sections 1, 2).

For citation:

Diveev A. I., Shmalko E. Yu., Hussein O. Quadrocopter control by the network operator method based on multi-point sta-

bilization, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 7, pp. 428–438.

DOI: 10.17587/mau.21.428-438

References

1. **Tabak D., Kuo B. C.** Optimal Control by Mathematical Programming, Prentice-Hall Inc. Englewood, Cliffs, New Jersey, 1971, 280 p.
2. **Fedorenko R. P.** An approximate solution of optimal control problems (series: "Mathematical library"), Nauka, Glavn. ed. Phys.-Math. lit., 1982 (in Russian).
3. **Kvasov D. E., Sergeyev Y. D.** Lipschitz global optimization methods in control problems, *Automation and Remote Control*, 2013, vol. 74, no. 9, pp. 1435–1448.
4. **Pontryagin L. S., Boltyansky V. G., Gamkrelidze R. V., Mishchenko E. F.** The mathematical theory of optimal processes, Moscow, Nauka, Main Edition of Physics and Mathematics, 1983 (in Russian).
5. **Arutyunov A., Karamzin D., Pereira F.** A nondegenerate maximum principle for the optimal control problem with state constraints, *SIAM J. Control Optim.*, 2005, vol. 43, no. 5, pp. 1812–1843.
6. **Milyutin A. A., Dmitruk A. V., Osmolovsky N. P.** *The maximum principle in optimal control*, Publishing house of Moscow State University, 2004 (in Russian).
7. **Gamkrelidze R. V.** Optimal control processes with limited phase coordinates, *Izvestiya AN SSSR. Mathematical Series*, 1960, no. 24, pp. 315–356 (in Russian).
8. **Diveev A. I.** Conditions for the absence of functional unimodality properties in the optimal control problem with phase constraints, *Cloud of science*, 2018, no. 2, pp. 268–285 (in Russian).
9. **Filimonov A. B., Filimonov N. B.** *Methods of "flexible" trajectories in the problems of terminal control of vertical maneuvers of aircraft*, Chap.2 in "Problems of managing complex dynamic objects of aviation and space technology", Ed. by S. N. Vasiliev, Moscow, Mashinostroenie, 2015, pp. 51–110 (in Russian).
10. **Diveev A. I., Shmalko E. Yu.** The method of synthesized optimal control for a group of robots, *NiKSS*, 2018, no. 4 (24), pp. 25–32 (in Russian).
11. **Gen K., Chulin N. A.** Algoritmy stabilizatsii dlya avtomaticheskogo upravleniya trayektornym dvizheniyem kvadroptera, *Nauka i obrazovaniye: nauchnoye izdaniye MGTU im. N. E. Bauman*, 2015, no. 5, pp. 218–235 (in Russian).
12. **Zenkevich S. L., Galustyan N. K.** Development of a mathematical model and synthesis of an algorithm for angular stabilization of quadcopter motion, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye*, 2014, no. 3, pp. 27–32 (in Russian).
13. **Zenkevich S. L., Galustyan N. K.** Synthesis and testing of an algorithm for controlling the motion of a quadcopter along a trajectory, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye*, 2015, vol. 16, no. 8, pp. 530–535 (in Russian).
14. **Cutler M., How J. P.** Actuator Constrained Trajectory Generation and Control for Variable-Pitch Quadrotors, *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference (GNC)*, Minneapolis, Minnesota, August 2012.
15. **Afanasyev V. N.** Optimal control systems, Moscow, Publishing house RUDN, 2007 (in Russian).
16. **Kolesnikov A. A.** Synergetic control methods for complex systems: the theory of system synthesis, KomKniga, Moscow, 2006 (in Russian).
17. **Kolesnikov A. A., Kolesnikov A. A., Kuzmenko A. A.** AKAR methods and back-stepping in the synthesis of non-linear control systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye*, 2016, vol. 17, no. 7, pp. 435–445 (in Russian).
18. **Khalil Hassan K.** Nonlinear systems, Upper Saddle River, Prentice Hall, NJ, 2002.
19. **Krstic M., Kanellakopoulos M., Kokotovic P. V.** Adaptive nonlinear control without overparametrization, *Systems & Control Letters*, 1992, vol. 19, iss. 3, pp. 177–185.
20. **Kuntsevich V. M., Lychak M. M.** *Synthesis of automatic control systems using Lyapunov functions*, Nauka, Moscow, 1977.
21. **Diveev A. I.** Numerical methods for solving the control synthesis problem, RUDN, 2019 (in Russian).
22. **Guryanov A. E.** Quadcopter control modeling, *Engineering Bulletin*, Bauman Moscow State Technical University, 2014, pp. 522–534 (in Russian).
23. **Kennedy J., Eberhart R.** Particle swarm optimization, *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia, 1995, IV, pp. 1942–1948.
24. **Diveev A. I., Konstantinov S. V.** Study of the Practical Convergence of Evolutionary Algorithms for the Optimal Program Control of a Wheeled Robot, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2018, vol. 57, no. 4, pp. 561–580.

Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

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

Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *М. Ю. Безменова*.

Сдано в набор 25.03.2020. Подписано в печать 10.06.2020. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН720. 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

ICCMA 2020

2020 The 8th International Conference on Control, Mechatronics and Automation will be held in Moscow, Russia on November 6-8, 2020.

Organizer: ICCMA 2020 is sponsored by Bauman Moscow State Technical University, Russia and it will be held in Bauman Moscow State Technical University.

HISTORY

ICCMA 2019 | NOV.6-8 |

TU DELFT, NETHERLANDS

The conference proceedings of ICCMA2019 included in IEEE Xplore, indexed by Ei Compendex .

ICCMA 2018 | OCT.12-14 |

TOKYO JAPAN

The conference proceedings of ICCMA2017 included in ACM Digital Library, indexed by Ei Compendex and Scopus.

ICCMA 2017 | OCT.11-13 |

UNIVERSITY OF ALBERTA

The conference proceedings of ICCMA2017 included in ACM Digital Library, indexed by Ei Compendex and Scopus.

ICCMA 2016 | DEC. 7-11 |

BARCELONA, SPAIN

The conference proceedings of ICCMA2016 included in ACM Digital Library, indexed by Ei Compendex and Scopus.

ICCMA 2015 | DEC. 21-22 |

BARCELONA, SPAIN

The conference papers was published by MATEC Web of Conferences (ISSN: 2261-236X), Vol. 42. Indexed by Ei Compendex and Scopus

ICCMA 2014 | DEC. 8-10 |

DUBAI, UAE

The conference papers was published by International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing (ISSN: 1793-8198), Journal of Automation and Control Engineering (ISSN: 2301-3702)

ICCMA 2013 | DEC. 6-7 |

SYDNEY, AUSTRALIA

2013 International conference on Control, Mechatronics and Automation was held in Sydney, Australia during December 6-7, 2013.

PROCEEDING

Submitted papers will be peer reviewed and accepted papers after proper registration will be included in the conference proceedings, and the papers are submitted for indexing through Ei Compendex, Web of Science (CPCI), and Scopus etc.

SPECIAL ISSUE IN MACHINES

Machines (ISSN 2075-1702) is an international peer-reviewed open access journal on machinery and engineering published quarterly online by MDPI.

High Visibility: indexed in the Emerging Sources Citation Index (ESCI) - Web of Science, from Vol. 5, in Inspec (IET) and in Scopus. Papers accepted by ICCMA 2020 can be recommended to Machines to be published in this special issue with at least 50% content extension.

TOPICS

- Design, modeling and control of precision motion systems
- Flexible robotics, Soft robotics
- Compliant mechanism
- Precision mechanism
- Mechatronic system design
- Vibration analysis and control
- Dynamics of flexible systems
- Fractional order system and control
- Nonlinear control for motion systems
- Smart automation

IMPORTANT DATES

Submission Deadline: June 10, 2020

Notification Deadline: July 10, 2020

Registration Deadline: July 30, 2020

Final Paper Check: October 20, 2020

COMMITTEE

Prof. Goro Obinata, Chubu University, Japan

Dr. Delowar Hossain, Hosei University, Tokyo, Japan

Prof. Jan Tommy Gravdahl, Norwegian

University of Science and Technology, Norway

Prof. Jing Zhou, University of Agder, Norway

Prof. Jörg Franke, Institute for Factory Automation and Production Systems, Germany

Prof. Yangquan Chen, MESA Lab, UC Merced, United States

etc...

CONTACT INFORMATION

Conference Secretary: Ms. Kate Wong
Email: iccma@academic.net

CO-SPONSORED BY



MEDIA SUPPORTED BY



TECHNICAL SUPPORTED BY





XI Международная (XXII Всероссийская) Конференция по Автоматизированному Электроприводу АЭП 2020 04-07 Октября 2020 Санкт-Петербург, Россия

Международная конференция по Автоматизированному Электроприводу (АЭП) впервые была проведена в 1930 году, и затем проводилась каждые 2-3 года в виде регулярных встреч широкого круга электротехников и электроэнергетиков страны. До 1991 года конференция имела статус Всесоюзной, с 1987 года получила статус международной. В настоящее время конференция АЭП консолидирует в себе ученых и научных сотрудников не только из России, но и со всего мира. С 2016 года конференция также проводится на английском языке, а труды конференции индексируются базами Scopus и WoS и осуществляется техническая поддержка сообществом Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике IEEE.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СЕКЦИИ

Темы конференции включают (но не ограничиваются ими):

1. Теория, анализ и проектирование электроприводов;
2. Силовые полупроводниковые преобразователи;
3. Системы управления силовой электроникой и электроприводами;
4. Управление энергопотреблением в энергосистемах;
5. Применение электроприводов в промышленности и на транспорте;
6. Современное оборудование, программное обеспечение и управление электроприводами;
7. Производство, экономика и маркетинг электроприводов;
8. Вопросы образования и переподготовки кадров в электротехнике.

МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ

Конференция пройдет в Университете ИТМО (Санкт-Петербург, Россия), являющимся одним из ведущих исследовательских университетов России, специализирующихся в области информационных и квантовых технологий. В нем обучается более 12 500 студентов. Университет ИТМО основан в 1900 году и в настоящее время он является лидером Проекта 5-100 по повышению конкурентоспособности ведущих российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров. Университет расположен в самом сердце Санкт-Петербурга, в нескольких минутах ходьбы от Эрмитажа и других исторических объектов, охраняемых Юнеско.

ВАЖНЫЕ ДАТЫ

- 2020-03-01 Загрузка полной версии статьи на рецензирование
- 2020-04-01 Уведомление о принятии к публикации
- 2020-06-01 Загрузка окончательной версии
- 2020-06-01 Перевод оплаты за участие и публикацию
- 2020-09-16 Доступна программа конференции
- 2020-10-04 - 2020-10-07 Даты конференции

ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ВЗНОСЫ

В стоимость входит участие в каждом мероприятии конференции, материалы конференции на USB-накопителе, кофе-брейки, обеды и билет на торжественный ужин.

- Члены сообществ IES, IAS, PELS - **120 USD**
- Члены сообщества IEEE - **150 USD**
- При отсутствии членства в IEEE - **200 USD**
- Студенты (не включен билет на торжественный ужин) - **50 USD**
- Дополнительный билет на торжественный ужин - **80 USD**.

Все принятые статьи на английском языке, представленные устно или в виде стендовых докладов будут индексируются базой данных IEEE Xplore для перекрестной ссылки в SCOPUS и Web of Science.

Все принятые статьи на русском языке, представленные устно или в виде стендовых докладов будут индексируются базой данных РИНЦ.

Председатели

Анучин А.С. (МЭИ - РФ)
Томасов В.С. (Университет ИТМО - РФ)
Кравченко О.А. (ЮРПУ(НПИ) - РФ)

Почетные председатели

Васильев В.Н. (Университет ИТМО - РФ)
Никифоров В.О. (Университет ИТМО - РФ)
Роголев Н.Д. (МЭИ - РФ)
Онищенко Г.Б. (МПУ - РФ)

Ответственный секретарь

Демидова Г.Л. (Университет ИТМО - РФ)

Международный научный комитет

Alexander Kuznetsov (THM - Германия)
Anouar Belahcen (Aalto - Финляндия)
Anton Rassõlkin (TalTech - Эстония)
Ants Kallaste (TalTech - Эстония)
Arifdjan Hashimov (TDU - Узбекистан)
Dmitri Vinnikov (TalTech - Эстония)
Drazen Dujic (EPFL - Швейцария)
Emil Levi (LJMU - Великобритания)
Fernando Briz (University of Oviedo - Испания)
Frede Blaabjerg (Aalborg University - Дания)
Giuseppe Tomasso (Università degli Studi di Cassino - Италия)
Ilya Galkin (RTU - Латвия)
Istvan Vajda (Obuda University - Венгрия)
Jamal Rizk (WSU - Австралия)
Johan Gyselink (ULB - Бельгия)
Johannes Zentner (HTWK Leipzig - Германия)
Juha Pyrhönen (LUT - Финляндия)
Lassi Aarniovuori (LUT - Финляндия)
Mariusz Malinowski (WUT - Польша)
Marko Hinkkanen (Aalto - Финляндия)
Pia Lindh (LUT - Финляндия)
Roberto Leidhold (OVGU - Германия)
Roman Pechanek (UWB - Чехия)
Ryszard Strzelecki (GUT - Польша)
Stanislav Aranovskiy (IETR - Франция)
Stefan Brock (PUT - Польша)
Tamás Orosz (UWB - Чехия)
Toomas Vaimann (TalTech - Эстония)
Vadim Utkin (Ohio State University - США)
Valery Vodovozov (TalTech - Эстония)
Van Khang Huynh (Agder University - Норвегия)
Vladimir Klepikov (NTU "KhPI" - Украина)
Yujing Liu (Chalmers - Швеция)
Yuriy Rozanov (MPEI - РФ)

Программный комитет

Galina Demidova (ИТМО - РФ)
Lev Rassudov (MPEI - РФ)
Anton Rassõlkin (TalTech - Эстония)
Toomas Vaimann (TalTech - Эстония)

Российский научный комитет (РФ)

Беспалов В. Я. (МЭИ)
Гуляев И. В. (МГУ им. Н.П. Огарева)
Храмшин В. Р. (Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова)
Козярук А. Е. (Горный университет)
Петроченков А. Б. (Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет)
Кравченко О. А. (Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова)
Лукиянов Сергей Иванович (Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова)
Радионова А. А. (ФГАОУ ВО «ЮрГУ (НИУ) Портной Ю. Т. (ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)
Розанов Ю. К. (МЭИ)
Сергиевский Ю. Н. (МЭИ)

Организационный комитет

Лукичев Д. В. (ИТМО - РФ)
Поляков Н. А. (ИТМО - РФ)
Юркова Л. А. (МЭИ - РФ)
Прудникова Ю. И. (МЭИ - РФ)
Бычкова Е. В. (МЭИ - РФ)

