ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

# М ЕХАТРОНИКА, ВТОМАТИЗАЦИЯ, У ПРАВЛЕНИЕ



Издается с 2000 года

ISSN 1684-6427 (Print)

ISSN 2619-1253 (Online)

DOI 10.17587/issn.1684-6427

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

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

Ответственный секретарь: БЕЗМЕНОВА М. Ю.

#### Редакционный совет:

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

#### Редколлегия:

DORANTES D. J., PhD, Турция GROUMPOS P. P., PhD, Греция ISIDORI A., PhD, Италия KATALINIC B., PhD, Австрия LIN CH.-Y., PhD, Тайвань MASON O. J., PhD, Ирландия ORTEGA R. S., PhD, Франция SKIBNIEWSKI M. J., PhD, США STRZELECKI R. M., PhD, Польша SUBUDHI B. D., PhD, Индия АЛИЕВ Т. А., д.т.н., Азербайджан ГАРАЩЕНКО 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. ЛЕБЕЛЕВ Г. Н., л.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

#### АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

#### РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

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

## THEORETICAL AND APPLIED SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

## MECHATRONICS, Vol. 21 2020 **AUTOMATION, CONTRO** No. 12 MEKHATRONIKA, AVTOMATIZATSIYA, UPRAVL

Published since 2000

#### Editor-in-Chief FILIMONOV N. B.

Deputy Editors-in-Chief: BOLSHAKOV A. A. PODURAEV Yu. V. YUSCHENKO A. S

#### **Responsible Secretary:** BEZMENOVA M. Yu.

Editorial Board: ANSHAKOV G. P. BOLOTNIK N. N. CHENTSOV A G CHERNOUSKO F. L. FEDOROV I B KALYAEVI A KURZHANSKI A. B. KUZNETSOV N. 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. VUSUPOV 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: BEZMENOVA M. Yu.

Director of the Publishing House: ANTONOV B. I.

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

DOI 10.17587/issn.1684-6427

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

Shadrin G. K. Synthesis of a Control Algorithm for Nonlinear Plant Using Correction of Con-

#### AUTOMATION AND CONTROL TECHNOLOGICAL PROCESSES

Guluyev G. A., Rzayev As. H., Pashyev F. H. Analysis of Processes Mechanized Oil Mining 

Kruglov S. P., Aksamentov D. N. A Method of Adaptive Control of an Overhead Crane with 

#### **ROBOT, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS**

Darintsev O. V., Migranov A. B. A Step-by-Step Algorithm for Finding the Optimal Strategy for 

Filaretov V. F., Gubankov A. S., Gornostaev I. V. The Method of Formation the Reference 

Vorob'eva N. S., Zhoga V. V., Zhoga L. V. Dynamic Synthesis of Parallel-Sequential Structure 

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

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ.

УДК 681.5.01

#### DOI 10.17587/mau.21.667-674

**Г. К. Шадрин,** канд. техн. наук, shadrin.g.k@yandex.ru, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

# Синтез алгоритма управления нелинейным объектом на основе коррекции динамики объекта и компенсации возмущений<sup>1</sup>

Предложен новый подход для решения задачи управления нелинейным нестационарным многоканальным объектом с сосредоточенными параметрами и аддитивными возмущениями. Уравнения объекта представлены в векторно-матричном виде с числом выходных переменных, равным числу управляющих воздействий. Поставлена задача управления выходом объекта в условиях доступности для контроля выходных переменных и переменных состояния. Уравнения объекта предварительно преобразовываются к линейному виду с параметрами, зависящими от состояния, времени и управляющих воздействий (форма State Dependent Coefficient, SDC). Затем используется метод коррекции динамики объекта и компенсации возмущений. Проработан вариант преобразования к форме SDC на основе метода Е. А. Барбашина. Введены определения обратных моделей объекта по каналам отработки задания и возмущений. Представлены алгебраические уравнения, решением которых определяются функциональные матрицы обратных моделей. Введены определения фильтров-эталонов, позволяющих совместно с обратными моделями выполнить физическую реализацию управляющего устройства. Рассмотрены уравнения, которым должны удовлетворять матрицы фильтров-эталонов.

На примерах выяснено, что часть коэффициентов фильтров-эталонов можно задавать произвольно. На основе метода коррекции динамики объекта и компенсации возмущений с использованием обратных моделей и фильтровэталонов построен физически реализуемый алгоритм управления данным объектом. Составляющие итогового алгоритма находятся алгебраическими преобразованиями функциональных матриц математической модели объекта и фильтров-эталонов. Представлены уравнения, воспроизводящие процессы в замкнутой системе управления. Из уравнений следует асимптотическая устойчивость этой системы и соответствие переходных процессов своим фильтрам-эталонам. Несмотря на то, что при построении системы использован принцип компенсации, получена многоканальная система, работающая по принципу обратной связи. Преимуществом данного подходя является простая процедура структурного синтеза алгоритма управления по физически наглядным исходным данным. На примерах показана эффективность полученных алгоритмов. Компьютерным моделированием показано соответствие поведения систем заданным требованиям. Намечены дальнейшие направления исследований.

**Ключевые слова:** система управления, многомерный нелинейный объект, компенсация возмущений, обратная модель, фильтр-эталон, алгоритм управления

#### Введение

По своей физической природе практически все процессы как объекты управления являются нелинейными, нестационарными и многомерными. Для построения систем управления этими процессами целесообразно использовать также нелинейные методы, учитывающие многоканальность и нестационарность объекта. Однако теория нелинейных систем управления пока не располагает универсальными инженерными методами структурного синтеза для таких объектов, есть лишь проработки для отдельных их классов [1-4]. Распространенным приемом является "обычная" линеаризация объекта в области рабочей точки и применение хорошо развитых линейных методов синтеза ([1-6] и др.). Другой подход заключается в линеаризации обратной связью [3, 4, 7, 20] и применяется в основном для аффинных систем. Далее опять используются линейные методы. После такой линеаризации не нужно автоматически или вручную подстраиваться под новый режим, но преобразования, связанные с этим подходом сложны, нетривиальны и применимы далеко не для всех объектов [3—5, 8]. Распространен также прием, заключающийся в представлении нелинейного объекта в виде линейной модели с параметрами, зависящими от состояния (State Dependent Coefficient, SDC) ([9—12, 21] и др.), и последующем составлении и решении уравнения Риккати, параметры которого также зависят от состояния (SDRE-метод). Метод связан со значительным объемом вычислений в процессе управления.

В данной статье также используется структура объекта в виде SDC, но задача управления решается по-иному. Здесь используется метод коррекции динамики объекта и компенсации возмущений, предложенный в работе [13], обладающий рядом преимуществ, среди которых можно отметить физическую наглядность зада-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Работа поддержана КН МОиН РК № АР 05130525.

ния исходных данных, получение многоканального алгоритма управления алгебраическими методами в аналитической форме, отсутствие статической ошибки регулирования. Метод частично проработан для линейных систем с постоянными параметрами [13, 14] и др., однако при использовании алгебраических преобразований функциональных матриц [17] он вполне может быть "приспособлен" для объектов в форме SDC. Представление объектов достаточно общего вида в форме SDC может быть выполнено сравнительно простыми средствами на основе метода, развитого Е. А. Барбашиным [15, 16].

В статье основное внимание обращено на практическое применение предлагаемого метода синтеза, поэтому доказательства утверждений и теорем опущены, но представлены четыре характерных примера. Доказательства могут быть выполнены несложным путем подстановок и преобразований алгебраических векторно-матричных уравнений.

#### Постановка задачи

Рассматривается нелинейный нестационарный многоканальный объект управления с аддитивными возмущениями

$$\dot{\mathbf{x}}_{0}^{\prime} = \boldsymbol{\beta}(\mathbf{x}_{0}, \mathbf{u}, \mathbf{t}), \, \mathbf{y}_{0}^{\prime} = \boldsymbol{\alpha}(\mathbf{x}_{0}, t); \\ \dot{\mathbf{x}}_{0} = \dot{\mathbf{x}}_{0}^{\prime} + \mathbf{f}_{\mathbf{x}}, \quad \mathbf{y}_{0} = \mathbf{y}_{0}^{\prime} + \mathbf{f}_{\mathbf{y}},$$

$$(1)$$

где  $\mathbf{x}_0 \in \mathbf{X}_0 \subset \mathbf{R}^n$  — вектор состояния;  $\mathbf{u} \in \mathbf{U} \subset \mathbf{R}^m$  — вектор управления;  $\mathbf{y}_0 \in \mathbf{Y}_0 \subset \mathbf{R}^m$  — вектор выхода;  $t \in T \subset \mathbf{R}$  — время;  $\mathbf{X}_0$ ,  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{Y}_0$ , T — заданные множества;  $\beta(\cdot) \in \mathbf{R}^n$ ,  $\alpha(\cdot) \in \mathbf{R}^m$  — заданные векторные функции;  $\mathbf{f}_{\mathbf{y}} \in \mathbf{R}^m$ ,  $\mathbf{f}_{\mathbf{x}} \in \mathbf{R}^n$  — неизвестные векторные возмущающие воздействия. Переменные и функции в соотношениях (1) ограничены в областях своего определения. Другие требования к ним определяются отдельно для каждого класса объектов или конкретного объекта. Доступными для контроля являются  $\mathbf{x}_0$ ,  $\mathbf{y}_0$ . Объект (1) должен быть управляем по состоянию на множестве  $\mathbf{X}_0$ .

Для синтеза алгоритма управления в данной статье используется метод коррекции динамики объекта и компенсации возмущений. Идея метода согласно работе [13] заключается во включении последовательно с объектом управления его обратной математической модели и вычитании из соответствующих переменных обратной модели всех внешних аддитивных воздействий. Недоступные для контроля воздействия оцениваются по рассогласованию соответствующих переменных объекта и обратной модели. Для возможности реализации управляющего устройства в цепи внешних воздействий обратной модели включены фильтры-эталоны, определяющие динамику поведения системы управления. Исходные уравнения (1) объекта управления должны быть представлены в форме SDC:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}'_0 \\ \mathbf{y}'_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}, t) & \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}, t) \\ \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}, t) & \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}, t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{u} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $A(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}, t)$ ,  $B(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}, t)$ ,  $C(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}, t)$ ,  $D(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}, t)$  — функциональные матрицы соответствующих размерностей.

Таким образом, нужно простыми средствами привести объект (1) к форме (2) и методом коррекции динамики объекта и компенсации возмущений, предложенным в работе [13], разработать алгоритм управления, обеспечивающий воспроизведение задания  $\mathbf{y} \in \mathbf{Y}_0 \subset \mathbf{R}^m$ на выходе этого объекта в условиях действия аддитивных возмущений  $\mathbf{f}_{\mathbf{y}}$ ,  $\mathbf{f}_{\mathbf{x}}$  с точностью до заданных эталонных динамических систем.

## Преобразование уравнений объекта управления к форме SDC

Введя обозначения  $\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{u} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \boldsymbol{\beta}(\mathbf{z}, t) \\ \boldsymbol{\alpha}(\mathbf{z}, t) \end{bmatrix} = \mathbf{f}(\mathbf{z}, t),$ запишем систему (1) в виде  $\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}'_0 \\ \mathbf{y}'_0 \end{bmatrix} = \mathbf{f}(\mathbf{z}, t)$ . Представим согласно методу Е. А. Барбашина [15, 16] функцию  $\mathbf{f}(\mathbf{z}, t)$  как  $\mathbf{f}(\mathbf{z}, t) = \mathbf{L}(\mathbf{z}, t)\mathbf{z}$ , причем

$$\mathbf{L}(\mathbf{z},t) = \int_{0}^{1} \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}\mathbf{z},t) d\boldsymbol{\theta}; \ \mathbf{J}(\mathbf{z},t) = \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{z},t)}{\partial \mathbf{z}}.$$
 (3)

Тогда (1) получаем в виде

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_0' \\ \mathbf{y}_0' \end{bmatrix} = \mathbf{L}(\mathbf{z}, t) \begin{bmatrix} \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{u} \end{bmatrix}.$$
(4)

Распишем матрицу Якоби в соотношении (3):

$$\mathbf{J}(\mathbf{z},t) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \boldsymbol{\beta}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}, t)}{\partial \mathbf{x}_0} & \frac{\partial \boldsymbol{\beta}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}, t)}{\partial \mathbf{u}} \\ \frac{\partial \boldsymbol{\alpha}(\mathbf{x}_0, t)}{\partial \mathbf{x}_0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} = \\ = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}, t) & \mathbf{J}_2(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}, t) \\ \mathbf{J}_3(\mathbf{x}_0, t) & \mathbf{0} \end{bmatrix}.$$
(5)

Согласно выражениям (3), (5) имеем

$$\mathbf{L}(\mathbf{z},t) = \begin{bmatrix} \int_{0}^{1} \mathbf{J}_{1}(\theta \mathbf{x}_{0}, \theta \mathbf{u}, t) d\theta & \int_{0}^{1} \mathbf{J}_{2}(\theta \mathbf{x}_{0}, \theta \mathbf{u}, t) d\theta \\ & \int_{0}^{1} \mathbf{J}_{3}(\theta \mathbf{x}_{0}, t) d\theta & \mathbf{0} \end{bmatrix} = (6)$$
$$= \begin{bmatrix} \mathbf{A}(\mathbf{x}_{0}, \mathbf{u}, t) & \mathbf{B}(\mathbf{x}_{0}, \mathbf{u}, t) \\ \mathbf{C}(\mathbf{x}_{0}, t) & \mathbf{0} \end{bmatrix}.$$

Подставляя выражение (6) в (4), получаем уравнения объекта управления (1) в виде

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}'_0 \\ \mathbf{y}'_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}, t) & \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}, t) \\ \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, t) & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{u} \end{bmatrix}; \quad (7)$$
$$\dot{\mathbf{x}}_0 = \dot{\mathbf{x}}'_0 + \mathbf{f}_{\mathbf{x}}, \quad \mathbf{y}_0 = \mathbf{y}'_0 + \mathbf{f}_{\mathbf{y}}.$$

Замечание 1. Первообразные функции в (6) при нижнем пределе интегрирования должны быть равны нулю.

Рассмотренное преобразование уравнений (1) к виду (7) не единственное [12, 19], но предложенный алгоритм отличается простотой и, предположительно, достаточной универсальностью.

## Определение обратных моделей и фильтров-эталонов

В дальнейшем для краткости записи вместо  $(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}, t)$  используется обозначение (·).

Определение 1. Систему

$$\mathbf{x} = \mathbf{E}(\cdot)\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{F}(\cdot)\mathbf{y}_{\phi}', \ \mathbf{u}_1 = \mathbf{G}(\cdot)\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{H}(\cdot)\mathbf{y}_{\phi}', \qquad (8)$$

где  $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$  — вектор переменных состояния;  $\mathbf{y}'_{\varphi} \in \mathbf{R}^m$  — вектор входных переменных;  $\mathbf{u}_1$  аддитивная составляющая вектора управления  $\mathbf{u}$ ;  $\mathbf{E}(\cdot)$ ,  $\mathbf{F}(\cdot)$ ,  $\mathbf{G}(\cdot)$ ,  $\mathbf{H}(\cdot)$  — матрицы соответствующих размерностей, назовем обратной моделью объекта управления по каналам отработки задания и  $\mathbf{f}_{\mathbf{y}}$ , если при  $\mathbf{u} = \mathbf{u}_1$ ,  $\mathbf{x}_0(0) = \mathbf{x}(0)$  соблюдаются равенства  $\mathbf{x}_0(t) = \mathbf{x}(t)$ ,  $\dot{\mathbf{x}}'_0(t) = \dot{\mathbf{x}}(t)$ ,  $\mathbf{y}'_0(t) = \mathbf{y}'_{\varphi}(t)$ .

Замечание 2. Принято, что ненулевая разность начальных условий для  $\mathbf{x}_0$  и  $\mathbf{x}$  входит в состав возмущений объекта (1).

**Утверждение 1.** Матрицы  $E(\cdot), F(\cdot), G(\cdot), H(\cdot)$ могут быть найдены решением функциональных уравнений

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(\cdot)\mathbf{E}(\cdot) + \mathbf{B}(\cdot)\mathbf{G}(\cdot) &= \mathbf{1}, \quad \mathbf{C}(\cdot)\mathbf{F}(\cdot) &= \mathbf{1}, \\ \mathbf{A}(\cdot)\mathbf{F}(\cdot) + \mathbf{B}(\cdot)\mathbf{H}(\cdot) &= \mathbf{0}, \quad \mathbf{C}(\cdot)\mathbf{E}(\cdot) &= \mathbf{0}. \end{aligned}$$

В (9) и далее в матричных уравнениях нулем обозначены нулевые матрицы, а единицами — диагональные единичные матрицы соответствующих размерностей.

Определение 2. Систему

$$\begin{split} \tilde{\mathbf{x}} &= \mathbf{E}(\cdot)\dot{\tilde{\mathbf{x}}}' + \mathbf{F}(\cdot)\Delta \mathbf{y}_{\phi}'; \ \Delta \mathbf{u} = \mathbf{G}(\cdot)\dot{\tilde{\mathbf{x}}}' + \mathbf{H}(\cdot)\Delta \mathbf{y}_{\phi}'; \\ \dot{\tilde{\mathbf{x}}}' &= \dot{\tilde{\mathbf{x}}} - \mathbf{f}_{\mathbf{x}_0}, \end{split}$$
(10)

где  $\tilde{\mathbf{x}} \in \mathbf{R}^n$  — вектор переменных состояния;  $\Delta \mathbf{u}$  — аддитивная добавка к вектору управления  $\mathbf{u}$ ;  $\mathbf{f}_{\mathbf{x}_0} \in \mathbf{R}^n$  — вектор оценки  $\mathbf{f}_{\mathbf{x}}$ ;  $\Delta \mathbf{y}_{\phi}' \in \mathbf{R}^m$  вектор входных переменных, назовем обратной моделью объекта управления по каналам отработки  $\mathbf{f}_{\mathbf{x}}$ . Замечание 3. Из-за необходимости дифференцирования векторов **x**,  $\tilde{\mathbf{x}}'$  обратные модели (8), (10) не могут быть физически реализованы. Для возможности их реализации в состав системы управления включаются фильтры-эталоны.

Определение 3. Систему

$$\dot{\mathbf{x}}_{\phi} = \mathbf{\Phi}_{1}(\cdot)\mathbf{x}_{\phi} + \mathbf{\Phi}_{2}(\cdot)\mathbf{y}'; \ \mathbf{y}_{\phi}' = \mathbf{\Phi}_{3}(\cdot)\mathbf{x}_{\phi} + \mathbf{\Phi}_{4}(\cdot)\mathbf{y}', \ (11)$$

где  $\mathbf{x}_{\varphi} \in \mathbf{R}^{n}$  — вектор переменных состояния;  $\mathbf{y}' \in \mathbf{R}^{m}$  — вектор входных переменных;  $\mathbf{\Phi}_{1}(\cdot)$ ,  $\mathbf{\Phi}_{2}(\cdot), \mathbf{\Phi}_{3}(\cdot), \mathbf{\Phi}_{4}(\cdot)$  — матрицы соответствующих размерностей, назовем фильтром-эталоном по каналам отработки задания и  $\mathbf{f}_{\mathbf{y}}$ , если при  $\mathbf{x}(0) =$  $= \mathbf{x}_{\varphi}(0)$  соблюдаются равенства  $\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}_{\varphi}(t)$ ,  $\dot{\mathbf{x}}(t) = \dot{\mathbf{x}}_{\varphi}(t)$  и обеспечивается единичный коэффициент передачи в статике.

Замечание 4. Одинаковые начальные условия  $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_{\varphi}(0)$  легко выполняются, так как эти переменные являются частью алгоритма управления.

**Утверждение 2.** Матрицы  $\Phi_1(\cdot), \Phi_2(\cdot), \Phi_3(\cdot), \Phi_4(\cdot)$  удовлетворяют системе функциональных уравнений

$$\mathbf{E}(\cdot)\mathbf{\Phi}_{1}(\cdot) + \mathbf{F}(\cdot)\mathbf{\Phi}_{3}(\cdot) = \mathbf{1}, \quad \mathbf{E}(\cdot)\mathbf{\Phi}_{2}(\cdot) = \mathbf{0}, 
\mathbf{\Phi}_{3}(\cdot)\mathbf{\Phi}_{1}^{-1}(\cdot)\mathbf{\Phi}_{2}(\cdot) = -\mathbf{1}, \quad \mathbf{\Phi}_{4}(\cdot) = \mathbf{0}.$$
(12)

Определение 4. Систему

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_{\phi}' = \mathbf{\Phi}_{r1}(\cdot)\tilde{\mathbf{x}}_{\phi}, \, \Delta \mathbf{y}_{\phi}' = \mathbf{\Phi}_{r3}(\cdot)\tilde{\mathbf{x}}_{\phi}, \, \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_{\phi}' = \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_{\phi} - \mathbf{f}_{\mathbf{x}\phi}, \, \, (13)$$

где  $\tilde{\mathbf{x}}_{\varphi} \in \mathbf{R}^{n}$  — вектор переменных состояния;  $\mathbf{f}_{\mathbf{x}\varphi} \in \mathbf{R}^{n}$  — вектор оценки  $\mathbf{f}_{\mathbf{x}}$ ;  $\mathbf{\Phi}_{r1}(\cdot), \mathbf{\Phi}_{r3}(\cdot)$  — матрицы соответствующих размерностей, назовем фильтром-эталоном по каналам отработки  $\mathbf{f}_{\mathbf{x}}$ , если при  $\tilde{\mathbf{x}}(0) = \tilde{\mathbf{x}}_{\varphi}(0)$  соблюдаются равенства  $\tilde{\mathbf{x}}(t) = \tilde{\mathbf{x}}_{\varphi}(t), \quad \tilde{\mathbf{x}}'(t) = \tilde{\mathbf{x}}'_{\varphi}(t).$ 

**Утверждение 3**. Матрицы  $\Phi_{r1}(\cdot), \Phi_{r3}(\cdot)$  должны удовлетворять функциональному уравнению:

$$\mathbf{E}(\cdot)\mathbf{\Phi}_{r1}(\cdot) + \mathbf{F}(\cdot)\mathbf{\Phi}_{r3}(\cdot) = \mathbf{1}.$$
 (14)

Замечание 5. Вычитание  $\mathbf{f}_{\mathbf{x}_0}$  из  $\dot{\tilde{\mathbf{x}}}$  в (11) и  $\mathbf{f}_{\mathbf{x}_{\phi}}$  из  $\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_{\phi}$  в (13) соответствует методу коррекции динамики объекта и компенсации возмущений [13].

Замечание 6. Соотношения (12) и (14) не определяют однозначно все функции матриц фильтров-эталонов, оставшиеся степени свободы используются для придания замкнутой системе заданных свойств.

#### Разработка алгоритма управления

Из соотношений (7), (8) и (11) следует, что фильтр-эталон и обратная модель по каналам отработки задания и  $\mathbf{f}_{y}$  включены последовательно с объектом управления. Тогда согласно принятому методу синтеза

$$\mathbf{y}' = \mathbf{y} - \mathbf{f}_{\mathbf{y}_0} \tag{15}$$

где  $\mathbf{f}_{\mathbf{y}_0}$  — оценка  $\mathbf{f}_{\mathbf{y}}$ , вычисляемая по формуле

$$\mathbf{f}_{\mathbf{v}_0} = \mathbf{y}_0 - \mathbf{y}'_0. \tag{16}$$

Фильтр-эталон и обратная модель по каналам отработки  $\mathbf{f}_{\mathbf{x}}$  включены также последовательно и формируют  $\Delta \mathbf{u}$ , поэтому оценки  $\mathbf{f}_{\mathbf{x}_0}$ ,  $\mathbf{f}_{\mathbf{x}_{\phi}}$ в соотношениях (10), (13), вычисляются следующим образом:

$$\mathbf{f}_{\mathbf{x}_0} = \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_0 - \dot{\tilde{\mathbf{x}}}', \, \mathbf{f}_{\mathbf{x}\phi} = \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_0 - \dot{\tilde{\mathbf{x}}}'_{\phi}, \tag{17}$$

где  $\tilde{\mathbf{x}}_0 = \dot{\mathbf{x}}_0 - \dot{\mathbf{x}}$ . Запишем управляющий сигнал **и** и рассогласование  $\boldsymbol{\varepsilon}$  в виде

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_1 + \Delta \mathbf{u}, \, \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{y} - \mathbf{y}_0. \tag{18}$$

Уравнения (7), (8), (10), (11), (13) вместе с (15)—(18) представляют собой замкнутую систему управления, составленную по методу коррекции динамики объекта и компенсации возмущений. Алгоритм и процессы управления в этой системе определяются теоремами 1 и 2.

**Теорема 1.** Алгоритм управления объектом (7) при соблюдении (8), (10), (11), (13), (15)—(18) записывается в виде

$$\dot{\mathbf{x}}_{\varphi} = \mathbf{R}_{1}(\cdot)\mathbf{x}_{\varphi} + \mathbf{\Phi}_{2}(\cdot)\boldsymbol{\varepsilon}; \mathbf{u} = \mathbf{R}_{3}(\cdot)\mathbf{x}_{\varphi} + \mathbf{N}_{1}(\cdot)\tilde{\mathbf{x}}_{0\varphi} + \mathbf{P}(\cdot)\boldsymbol{\varepsilon};$$
(19)

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{1}(\cdot) &= \mathbf{\Phi}_{1}(\cdot) + \mathbf{\Phi}_{2}(\cdot)\mathbf{\Phi}_{3}(\cdot); \\ \mathbf{R}_{3}(\cdot) &= \mathbf{N}(\cdot) + \mathbf{P}(\cdot)\mathbf{\Phi}_{3}(\cdot); \ \mathbf{P}(\cdot) = \mathbf{G}(\cdot)\mathbf{\Phi}_{2}(\cdot); \\ \mathbf{N}(\cdot) &= \mathbf{G}(\cdot)\mathbf{\Phi}_{1}(\cdot) + \mathbf{H}(\cdot)\mathbf{\Phi}_{3}(\cdot); \\ \mathbf{N}_{1}(\cdot) &= \mathbf{G}(\cdot)\mathbf{\Phi}_{r1}(\cdot) + \mathbf{H}(\cdot)\mathbf{\Phi}_{r3}(\cdot); \\ \tilde{\mathbf{x}}_{0\phi} &= \mathbf{x}_{0} - \mathbf{x}_{\phi}; \ \varepsilon &= \mathbf{y} - \mathbf{y}_{0}. \end{aligned}$$
(20)

**Теорема 2.** Процессы управления объектом (7) посредством регулятора (19) описываются уравнениями

$$\begin{split} \dot{\mathbf{x}}_{\varphi} &= \mathbf{\Phi}_{1}(\cdot)\mathbf{x}_{\varphi} - \mathbf{\Phi}_{2}(\cdot)\mathbf{C}(\cdot)\tilde{\mathbf{x}}_{0\varphi} + \mathbf{\Phi}_{2}(\cdot)(\mathbf{y} - \mathbf{f}_{\mathbf{y}}); \\ \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_{0\varphi} &= \mathbf{\Phi}_{r1}(\cdot)\tilde{\mathbf{x}}_{0\varphi} + \mathbf{f}_{\mathbf{x}}; \\ \boldsymbol{\varepsilon} &= -\mathbf{\Phi}_{3}(\cdot)\mathbf{x}_{\varphi} - \mathbf{C}(\cdot)\tilde{\mathbf{x}}_{0\varphi} + \mathbf{y} - \mathbf{f}_{\mathbf{y}}. \end{split}$$
(21)

#### Примеры

*Пример 1*. Одномерный объект управления задан в виде

$$\dot{x}'_0 = a x_0 u^3, \ y'_0 = x_0^2, y_0 = y'_0 + f_y, \ \dot{x}_0 = \dot{x}'_0 + f_x,$$
(22)

где  $x_0 > 0$ . Требуется разработать управляющее устройство, которое, изменяя *u*, поддерживает значение  $y_0$  на заданном уровне y > 0 с точностью до фильтров-эталонов.

Приводим объект (22) к виду (7), для чего по выражениям (5) и (6) вычисляем

$$\mathbf{J}(\mathbf{z}) = \begin{bmatrix} au^3 & 3ax_0u^2\\ 2x_0 & 0 \end{bmatrix};$$
$$\mathbf{L}(\mathbf{z}) = \begin{bmatrix} \int_0^1 \theta^3 au^3 d\theta & \int_0^1 \theta^3 3x_0u^2 d\theta \\ \int_0^1 2x_0 \theta d\theta & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4}au^3 & \frac{3}{4}ax_0u^2\\ x_0 & 0 \end{bmatrix}.$$

В итоге преобразованное уравнение (22) принимает вид

$$\begin{bmatrix} \dot{x}'_{0} \\ y'_{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4}au^{3} & \frac{3}{4}ax_{0}u^{2} \\ x_{0} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{0} \\ u \end{bmatrix}.$$
 (23)

Используя (23), составляем систему (9):

$$\frac{1}{4}au^{3}\mathbf{E}(\cdot) + \frac{3}{4}ax_{0}u^{2}\mathbf{G}(\cdot) = 1, x_{0}\mathbf{F}(\cdot) = 1,$$
$$\frac{1}{4}au^{3}\mathbf{F}(\cdot) + \frac{3}{4}ax_{0}u^{2}\mathbf{H}(\cdot) = 0, x_{0}\mathbf{E}(\cdot) = 0,$$

откуда получаем

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}(\cdot) & \mathbf{F}(\cdot) \\ \mathbf{G}(\cdot) & \mathbf{H}(\cdot) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{x_0} \\ \frac{4}{3ax_0u^2} & -\frac{u}{3x_0^2} \end{bmatrix}.$$
 (24)

Обозначим для данного примера

$$\begin{bmatrix} \mathbf{\Phi}_{1}(\cdot) & \mathbf{\Phi}_{2}(\cdot) \\ \mathbf{\Phi}_{3}(\cdot) & \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{1}(\cdot) & \varphi_{2}(\cdot) \\ \varphi_{3}(\cdot) & 0 \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{\Phi}_{r1}(\cdot) \\ \mathbf{\Phi}_{r3}(\cdot) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{r1}(\cdot) \\ \varphi_{r3}(\cdot) \end{bmatrix}.$$
(25)

Используя (24), (25), составляем систему (12):

$$\frac{1}{x_0} \varphi_3(\cdot) = 1, \ \varphi_3(\cdot) \frac{1}{\varphi_1(\cdot)} \varphi_2(\cdot) = -1,$$
  
или  $\varphi_3(\cdot) = x_0, \ \varphi_2(\cdot) = -\varphi_1(\cdot) \frac{1}{x_0}.$  (26)

В (26) назначаем  $\varphi_1(\cdot)$  свободным коэффициентом  $\varphi_1$ , тогда  $\varphi_3(\cdot) = x_0$ ,  $\varphi_2(\cdot) = -\varphi_1 \frac{1}{x_0}$ . Записывая (14) и назначая  $\varphi_{r1}(\cdot)$  свободным коэффициентом  $\varphi_{r1}$ , аналогично получаем  $\varphi_{r3}(\cdot) = x_0$ . Таким образом, имеем

$$\begin{bmatrix} \mathbf{\Phi}_{1}(\cdot) & \mathbf{\Phi}_{2}(\cdot) \\ \mathbf{\Phi}_{3}(\cdot) & \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{1} & -\varphi_{1} \frac{1}{x_{0}} \\ x_{0} & 0 \end{bmatrix}, \quad (27)$$
$$\begin{bmatrix} \mathbf{\Phi}_{r1}(\cdot) \\ \mathbf{\Phi}_{r3}(\cdot) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{r1} \\ x_{0} \end{bmatrix}.$$

Подставляя (27) в (20), находим  $\mathbf{R}_1(\cdot) = 0$ ,  $\mathbf{N}(\cdot) = \frac{4}{3ax_0u^2} \varphi_1 - \frac{u}{3x_0}$ ,  $\mathbf{N}_1(\cdot) = \frac{4}{3ax_0u^2} \varphi_{r1} - \frac{u}{3x_0}$ ,  $\mathbf{P}(\cdot) = -\frac{4}{3ax_0^2u^2} \varphi_1$ ,  $\mathbf{R}_3(\cdot) = -\frac{u}{3x_0}$ , и после преобразований получаем уравнения регулятора (19) для данного примера:

$$\dot{x}_{\varphi} = -\frac{\varphi_1}{x_0}\varepsilon, \quad u = \sqrt[3]{\frac{1}{ax_0}} \left(\varphi_{r_1}\tilde{x}_{0\varphi} - \frac{\varphi_1}{x_0}\varepsilon\right), \quad (28)$$
$$\tilde{x}_{0\varphi} = x_0 - x_{\varphi}, \quad \varepsilon = y - y_0.$$

Подставляя функции из (23), (27) в (21), определяем уравнения, описывающие процессы в замкнутой системе управления:

$$\dot{x}_{\varphi} = \varphi_{1} x_{\varphi} + \varphi_{1} \tilde{x}_{0\varphi} - \varphi_{1} \frac{1}{x_{0}} (y - f_{y}),$$

$$\dot{\tilde{x}}_{0\varphi} = \varphi_{r1} \tilde{x}_{0\varphi} + f_{x}, \ \varepsilon = -x_{0} x_{\varphi} - x_{0} \tilde{x}_{0\varphi} + y - f_{y}.$$
(29)

Исследование качества регулирования и параметрической чувствительности выполнено методом компьютерного моделирования и заключается в анализе переходных процессов в системе, составленной из соотношений (22) и (28) при изменении коэффициента *а* в (22).

На рис. 1 показаны переходные процессы при номинальных значениях a = 1,  $\varphi_1 = -1$ ,  $\varphi_{r1} = -2$  в (28), исходном задании y = 9 и значениях a в (22), равных 0,5, 1, 1,5. Ступенчатые внешние воздействия амплитудой пять единиц здесь разнесены во времени: через одну секунду y, затем  $f_y$  и наконец  $f_x$ . Анализ показывает соответствие этих процессов уравнениям (29).

Пример 2. Имеем технологическую емкость с жидкостью и сливным трубопроводом. В емкость подается управляемый поток жидкости.



Fig. 1. Graphs of  $y_0(t)$  and u(t) in (22), (28) for different values of a

Требуется, изменяя входной поток, поддерживать заданный вес жидкости в емкости в условиях действия возмущений. Данный объект описывается уравнениями [18]

$$\frac{dx_0}{dt} = -a\sqrt{x_0} + bu, \ y_0 = cx_0, \tag{30}$$

где  $x_0$ ,  $y_0$  — уровень и вес жидкости в емкости; u — входной поток жидкости,  $x_0 > 0$ . Возмущения в (30) не показаны. Коэффициенты a, b, c зависят от параметров емкости, жидкости и сливного трубопровода. Преобразуя (30) посредством (5) и (6), получаем

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_0 \\ y'_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -ax_0^{-1/2} & b \\ c & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ u \end{bmatrix}.$$
 (31)

Используя соотношения (9), (12), (14), (31) и назначая  $\varphi_1$ ,  $\varphi_{r1}$  свободными коэффициентами, находим параметры обратной модели и фильтров-эталонов:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}(\cdot) & \mathbf{F}(\cdot) \\ \mathbf{G}(\cdot) & \mathbf{H}(\cdot) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{c} \\ \frac{1}{b} & \frac{ax_0^{-1/2}}{cb} \end{bmatrix},$$
$$\begin{bmatrix} \mathbf{\Phi}_1(\cdot) & \mathbf{\Phi}_2(\cdot) \\ \mathbf{\Phi}_3(\cdot) & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_1 & -\varphi_1 \frac{1}{c} \\ c & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{\Phi}_{r1}(\cdot) \\ \mathbf{\Phi}_{r3}(\cdot) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{r1} \\ c \end{bmatrix}.$$

Тогда регулятор (19) для данного примера принимает вид

$$\dot{x}_{\varphi} = -\frac{\varphi_{1}}{c}\varepsilon,$$

$$u = \frac{1}{b} \left( a x_{0}^{-1/2} x_{\varphi} + (\varphi_{r1} + a x_{0}^{-1/2}) \tilde{x}_{0\varphi} - \frac{1}{c} \varphi_{1} \varepsilon \right), \quad (32)$$

$$\tilde{x}_{0\varphi} = x_{0} - x_{\varphi}, \quad \varepsilon = y - y_{0},$$

а процессы в замкнутой системе управления описываются уравнениями

$$\begin{split} \dot{x}_{\varphi} &= \varphi_{1} x_{\varphi} + \varphi_{1} \tilde{x}_{0\varphi} - \varphi_{1} \frac{1}{c} (y - f_{y}), \\ \dot{\tilde{x}}_{0} &= \varphi_{r1} \tilde{x}_{0\varphi} + f_{x}, \\ \varepsilon &= -c x_{\varphi} - c \tilde{x}_{0\varphi} + y - f_{y}. \end{split}$$
(33)

На рис. 2 показаны результаты исследования качества регулирования и чувствительности системы управления на компьютерной модели, состоящей из уравнений (30) и (32). Здесь, как и в примере 1, ступенчатые изменения y,  $f_y$  и  $f_x$  амплитудой пять единиц разнесены во времени. При моделировании в (32) приняты расчетные значения a = b = c = 1,  $\varphi_1 = \varphi_{r1} = -1$  и исходное задание y = 3. Коэффициенты a, b, c в (30) поочередно изменялись на ±50 % от своих номинальных значений. Здесь также процессы соответствуют (33).



Рис. 2. Графики изменения  $y_0(t)$  в системе (30), (32) при вариациях *a*, *b*, *c* в (30)



Рис. 3. Графики изменения  $y_0(t)$  и u(t) в системе (34), (37) Fig. 3. Graphs of  $y_0(t)$  and u(t) in (34), (37)

*Пример 3.* Имеем нестационарный линейный объект управления

$$\dot{x}_{01} = (a_{01} + kt)x_{01} + a_2x_{02} + u - f_{x1},$$
  

$$\dot{x}_{02} = x_{01} - f_{x2},$$
  

$$y_0 = c_1x_{01} + c_2x_{02} - f_y,$$
(34)

где t > 0. Составляя и решая уравнения (9), (12), (14) для (34) и назначая  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_{r1}$ ,  $\varphi_{r2}$  свободными коэффициентами, находим матрицы обратной модели и фильтров-эталонов:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}(\cdot) & \mathbf{F}(\cdot) \\ \mathbf{G}(\cdot) & \mathbf{H}(\cdot) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{c_1}{c_2} & \frac{1}{c_2} \\ 1 & -(a_{01} + kt) + a_2 \frac{c_1}{c_2} & -\frac{a_2}{c_2} \end{bmatrix}; \quad (35)$$
$$\begin{bmatrix} \mathbf{\Phi}_1(\cdot) & \mathbf{\Phi}_2(\cdot) \\ \mathbf{\Phi}_3(\cdot) & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_1 & \varphi_2 & -\frac{\varphi_2}{c_2} \\ 1 & 0 & 0 \\ c_1 & c_2 & 0 \end{bmatrix}; \quad (36)$$
$$\begin{bmatrix} \mathbf{\Phi}_{r1}(\cdot) \\ \mathbf{\Phi}_{r3}(\cdot) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{r1} & \varphi_{r2} \\ 1 & 0 \\ c_1 & c_2 \end{bmatrix}.$$

Подставляя выражения (35), (36) в (20), получаем уравнения (19) алгоритма управления:

$$\dot{x}_{\varphi 1} = \left(\varphi_{1} - \frac{c_{1}}{c_{2}}\varphi_{2}\right) x_{\varphi 1} - \frac{\varphi_{2}}{c_{2}}\varepsilon,$$

$$\dot{x}_{\varphi 2} = x_{\varphi 1}, \quad \varepsilon = y - y_{0},$$

$$u = \left(\varphi_{1} - (a_{01} + kt) - \frac{c_{1}}{c_{2}}\varphi_{2}\right) x_{\varphi 1} - a_{2}x_{\varphi 2} +$$

$$+ (\varphi_{r1} - (a_{01} + kt))\tilde{x}_{0\varphi 1} + (\varphi_{r2} - a_{2})\tilde{x}_{0\varphi 2} - \frac{\varphi_{2}}{\varepsilon}\varepsilon,$$
(37)

$$\begin{aligned} \tilde{x}_{0,01} &= x_{0,1} - x_{0,1}, \quad \tilde{x}_{0,02} &= x_{0,2} - x_{0,2}, \\ \tilde{x}_{0,01} &= x_{0,1} - x_{0,1}, \quad \tilde{x}_{0,02} &= x_{0,2} - x_{0,2}. \end{aligned}$$

На рис. 3 показаны переходные функции, полученные на компьютерной модели системы (34), (37). Здесь единичные ступенчатые изменения  $y, f_y$ и  $f_x$ , как и ранее, разнесены во времени. При моделировании принято:  $a_{01} + kt = -1 + 0.2t$ ,  $a_2 = -1$ ,  $c_1 = 0$ ,  $c_2 = 1$ ,  $\varphi_1 = \varphi_{r1} = -1.73$ ,  $\varphi_2 = \varphi_{r2} = -1$ . Отметим, что данный объект управления без регулятора через пять секунд становится неустойчивым.

*Пример* 4. Двухканальный неустойчивый объект управления задан в виде

$$\dot{x}_{01}' = x_{01}x_{02} + u_1, \quad y_{01}' = x_{01}, \dot{x}_{02}' = x_{01}^2 + x_{02}^2 + u_2, \quad y_{02}' = x_{02}, y_{01} = y_{01}' + f_{y1}, \quad \dot{x}_{01} = \dot{x}_{01}' + f_{x1}, y_{02} = y_{02}' + f_{y2}, \quad \dot{x}_{02} = \dot{x}_{02}' + f_{x2},$$

$$(38)$$

где  $x_1 > 0$ ,  $x_2 > 0$ . Требуется, как и ранее разработать управляющее устройство, которое, изменяя  $u_1$ ,  $u_2$ , поддерживает значения  $y_{01}$ ,  $y_{02}$ на заданном уровне с точностью до фильтровэталонов. Должна быть обеспечена автономность системы по каналам управления.

Преобразуя (38) с использованием соотношений (5) и (6), получаем

$$\begin{bmatrix} \dot{x}'_{01} \\ \dot{x}'_{02} \\ y'_{01} \\ y'_{02} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0, 5x_{02} & 0, 5x_{01} & 1 & 0 \\ x_{01} & x_{02} & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{01} \\ x_{02} \\ u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}.$$
 (39)

Задавая матрицы свободных коэффициентов в виде

$$\boldsymbol{\Phi}_{1}(\cdot) = \begin{bmatrix} \phi_{1} & 0\\ 0 & \phi_{2} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\Phi}_{r1}(\cdot) = \begin{bmatrix} \phi_{r1} & 0\\ 0 & \phi_{r2} \end{bmatrix}, \quad (40)$$

используя (39), по выражениям (9), (13) находим

$$\mathbf{\Phi}_{2}(\cdot) = \begin{bmatrix} -\varphi_{1} & 0\\ 0 & -\varphi_{2} \end{bmatrix}, \ \mathbf{\Phi}_{3}(\cdot) = \begin{bmatrix} 1 & 0\\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{\Phi}_{r3}(\cdot) = \begin{bmatrix} 1 & 0\\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \ \mathbf{E}(\cdot) = \begin{bmatrix} 0 & 0\\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \ \mathbf{F}(\cdot) = \begin{bmatrix} 1 & 0\\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (41)$$
$$\mathbf{G}(\cdot) = \begin{bmatrix} 1 & 0\\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \ \mathbf{H}(\cdot) = \begin{bmatrix} -0, 5x_{02} & -0, 5x_{01}\\ -x_{01} & -x_{02} \end{bmatrix}.$$

Отметим, что для обеспечения автономности по каналам управления коэффициенты в (40) на неглавных диагоналях приняты равными нулю.

Регулятор для объекта (38), определенный подстановкой (40), (41) в (19), (20), после преобразований принимает вид

$$\begin{aligned} \dot{x}_{\varphi 1} &= -\varphi_{1}\varepsilon_{1}, \quad \dot{x}_{\varphi 2} = -\varphi_{2}\varepsilon_{2}, \\ u_{1} &= -x_{02}x_{01} + \varphi_{r1}\tilde{x}_{0\varphi 1} - \varphi_{1}\varepsilon_{1}, \\ u_{2} &= -(x_{01}^{2} + x_{02}^{2}) + \varphi_{r2}\tilde{x}_{0\varphi 2} - \varphi_{2}\varepsilon_{2}, \\ \tilde{x}_{0\varphi 1} &= x_{01} - x_{\varphi 1}, \quad \tilde{x}_{0\varphi 2} = x_{02} - x_{\varphi 2}, \\ \varepsilon_{1} &= y_{1} - y_{01}, \quad \varepsilon_{2} = y_{2} - y_{02}, \end{aligned}$$
(42)

где  $\varphi_1 < 0$ ,  $\varphi_2 < 0$ ,  $\varphi_{r1} < 0$ ,  $\varphi_{r2} < 0$ ;  $y_1$ ,  $y_2$  — задания соответственно для  $y_{01}$  и  $y_{02}$ . Процессы в замкнутой двухканальной системе регулирования согласно (21) описываются уравнениями

$$\begin{aligned} \dot{x}_{\varphi 1} &= \varphi_1 x_{\varphi 1} + \varphi_1 \tilde{x}_{0\varphi 1} - \varphi_1 (y_1 - f_{y1}), \\ \dot{x}_{\varphi 2} &= \varphi_2 x_{\varphi 2} + \varphi_{21} \tilde{x}_{0\varphi 2} - \varphi_2 (y_2 - f_{y2}), \\ \dot{\tilde{x}}_{0\varphi 1} &= \varphi_{r1} \tilde{x}_{0\varphi 1} + f_{x1}, \, \dot{\tilde{x}}_{0\varphi 2} = \varphi_{r2} \tilde{x}_{0\varphi 2} + f_{x2}, \\ \varepsilon_1 &= -x_{\varphi 1} - \tilde{x}_{0\varphi 1} + (y_1 - f_{y1}), \\ \varepsilon_2 &= -x_{\varphi 2} - \tilde{x}_{0\varphi 2} + (y_2 - f_{y2}). \end{aligned}$$
(43)

Компьютерное моделирование системы, составленной из соотношений (38) и (42), показало соответствие ее поведения при внешних воздействиях уравнениям (43).

#### Заключение

При разработке данного алгоритма управления обратную связь и интегральную составляющую в алгоритме управления нигде не постулировали, использовали лишь принцип компенсации. Эти связь и составляющая появились при оценке аддитивных возмушений на переменные объекта управления и вычитании после фильтрации этих оценок из соответствующих переменных обратной модели. Благодаря такому подходу удалось разработать процедуру структурного синтеза алгоритма управления многоканальным нелинейным нестационарным объектом. В полученной замкнутой системе проводится коррекция собственной динамики объекта управления посредством его обратных математических моделей и замена этой динамики желаемой динамикой фильтров-эталонов. "Платой" за такое решение является необходимость информации о выходных переменных и переменных состояния объекта. Применение наблюдателей состояния требует дополнительной проработки. Легкость и наглядность синтеза регуляторов показана в общем случае и на простых примерах. Определение фильтров-эталонов в общем случае является неформальным и требует дальнейших исследований.

Полученный алгоритм благодаря своим преимуществам может найти применение для решения практических задач управления сложными линейными и нелинейными объектами.

#### Список литературы

1. Квакернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. М.: Мир, 1977.

2. Атанс. М., Фалб П. Оптимальное управление. М.: Машиностроение, 1968.

3. Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000.

4. Ким Д. П. Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные, нелинейные оптимальные и адаптивные системы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.

5. Khalil N. K. Nonlinear systems. New Jersey, Prentice Hall, 2002.

6. Albertos P., Sala A. Multivariable control systems. Springer-Verlag London, 2004.

 Isidori A. Nonlinear control systems. Berlin: Springer, 1995.
 Nijmeijer H., van der Schaft A. J. Nonlinear Dynamical Control Systems. Springer-Verlag. New York, 1990.

9. Афанасьев В. Н. Управление нелинейными объектами с параметрами, зависящими от состояния // АиТ. 2011. № 4. С. 43—56.

10. Friedland B. Quasi Optimal Control and the SDRE Method. Proc // 17'IFAC Sympos. Automat. Control Aerospace. Toulouse, France, 2007.

11. Skogestad S., Postlethwaite I. Multivariable Feedback Control. Wiley, NY, 1996.

12. Shamma J. S., Cloutier J. R. Existence of SDRE Stabilizing Feedback // IEEE Transactions on Automatic Control. 2003. N. 48(3).

13. Шадрин Г. К. Физический подход к построению систем управления на основе компенсации динамики объекта и возмущений // АиТ. 2016. № 7. С. 33–46.

14. Шадрин Г. К., Порубов Д. А., Шадрин М. Г. Синтез алгоритма управления движением двухколесного робота методом компенсации динамики объекта и возмущений // Автоматика и программная инженерия. 2017. № 4(22). С. 10–15.

15. Барбашин Е. А. Функции Ляпунова. М.: Наука, 1970.

16. Подчукаев В. А. Теория автоматического управления.
 М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.

17. Бортаковский А. С., Пантелеев А. В. Линейная алгебра в примерах и задачах. М.: Высшая школа, 2005.

18. **Bao Jie, Lee Peter L.** Process Control. The Passive Systems Approach. Springer-Verlag London Limited, 2007.

19. Yoshihiro Sakayanagi, Daisuke Nakayama, Shigeki Nakaura, Mitsuji Sampe. Clarification of Free Parameters of State-dependent Coefficient Form: Effect on Solving State-dependent Riccati Inequality // Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea, July 6–11, 2008.

20. **Кабанов А. А.** Приближенная линеаризация обратной связью на основе сингулярно возмущенного подхода // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. № 8. С. 515—522.

21. Афанасьев В. Н. Гарантированное управление нелинейным объектом (на примере ядерного реактора на тяжелой воде) // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 5. С. 2—4.

# Synthesis of a Control Algorithm for Nonlinear Plant Using Correction of Controlled Plant Dynamics and Compensation of Perturbations

**G. K. Shadrin,** Associated Professor, shadrin.g.k@yandex.ru, D Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan

Corresponding author: Shadrin G. K., Associated Professor, D Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan, e-mail: shadrin.g.k@yandex.ru

Accepted on August 06, 2020

#### Abstract

This paper introduces a new approach to control of nonlinear non-stationary multichannel plant with lumped parameters and additive perturbations. Controlled plant is represented as a set of equations in matrix-vector form, with number of output variables equal to the number of controlled variables. The problem is stated as follows: to control plant output provided that output variables and state variables are observable. Plant equations are converted into a state dependent coefficient (SDC) form, then method of correction of plant dynamics and compensation of perturbations is used. A variant of conversion to the SDC form based on E. A. Barabashin's method is suggested. Reverse models of the plant are defined with respect to reference and deviation channels. Algebraic equations are presented, which, when solved, yield reverse models. Definitions of etalon filters are introduced, allowing a physical implementation of a controller when used in conjunction with reverse models. Conditions to which matrices of etalon filters must conform are considered. It was found by examples that part of coefficients of etalon filters can be chosen arbitrarily. Using the method of correction of controlled plant dynamics and perturbations, utilizing reverse models and etalon filters, a physically implementable controller algorithm was constructed. Then it was transformed to physically implementable form using equivalent transformations. Components of the final algorithm are obtained by the means of algebraic transformations of functional matrices of the plant and etalon filter. Equations for closed control system are presented. It follows from these equations that system is asymptotically stable and that transient processes correspond with their respective etalon filters. Even though compensation method was used, a multichannel closed-loop control system was obtained. An advantage of suggested method is that it allows a simple procedure for the control algorithm synthesis using evident physical initial data. The efficacy of obtained algorithms was verified using several examples. Computer simulation showed that control systems are robust and comply with specified requirements. Directions for further research were suggested.

**Keywords:** control system, multi-variable nonlinear plant, disturbance compensation, inverse model, etalon filter, control algorithm

#### For citation:

Shadrin G. K. Synthesis of a Control Algorithm for Nonlinear Plant Using Correction of Controlled Plant Dynamics and Compensation of Perturbations, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie,* 2020, vol. 21, no. 12, pp. 667–674.

DOI: 10.17587/mau.21.667-674

#### References

1. Kwakernaak H., Sivan R. Linear Optimal Control Systems, New Jersey, Wiley-Interscience, 1972.

2. Athans M., Falb P. Optimal Control: An Introduction to the Theory and Its Applications, New York, McGraw-Hill – Lincoln Laboratory publications, 1966.

3. **Miroshnik I. V., Nikiforov V. O., Fradkov A. L.** Nonlinear Adaptive Control of Complex Dynamic Systems, SPb., Nauka, 2000 (in Russian).

4. **Kim D. P.** Multdimensional Nonlinear Optimal and Adaptive Systems, vol. 2, Moscow, Fizmatlit, 2004 (in Russian).

5. Khalil N. K. Nonlinear Systems New Jersey, Prentice Hall, 2002.

6. Albertos P., Sala A. Multivariable Control Systems, Springer-Verlag, London, 2004.

7. Isidori A. Nonlinear Control Systems, Berlin, Springer, 1995.

8. **Nijmeijer H., van der Schaft A. J.** Nonlinear Dynamical Control Systems, Springer-Verlag, New York, 1990.

9. Afanas'ev V. N. Control of Nonlinear Plants With State-dependent Coefficients, *Autom. Remote Control*, **72**:4 (2011), 713–726.

10. Friedland B. Quasi Optimal Control and the SDRE Method. Proc, 17'IFAC Sympos. Automat. Control Aerospace, Toulouse, France, 2007.

11. Skogestad S., Postlethwaite I. Multivariable Feedback Control, Wiley, NY, 1996.

12. Shamma J. S., Cloutier J. R. Existence of SDRE Stabilizing Feedback, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, No. 48(3).

13. Shadrin G. K. A Physics-Based Approach to Control Systems Design Using Compensation of Controlled Plant Dynamics and Perturbations, *Automation and Remote Control*, 2016, vol. 77, no. 7, pp. 1151–1162, DOI: 10.1134/S0005117916070031.

14. Shadrin G. K., Porubov D. A., Shadrin M. G. Synthesis of a Control Algorithm For a Two-Wheeled Robot Using Method of Compensation of Plant Dynamics And Perturbations, *Avtomatika i programmnaya inzheneriya*, 2017, no. 4(22), pp. 10–15 (in Russian).

15. Barbashin E. A. Lyapunov Functions, Moscow, Nauka, 1970 (in Russian).

16. **Podchukaev V. A.** Theory of Automatic Control, Moscow, Fizmatlit, 2004 (in Russian).

17. Bortakovskij A. S., Panteleev A. V. Linear Algebra, Moscow, Vysshaya shkola, 2005 (in Russian).

18. **Bao Jie, Lee Peter L.** Process Control. The Passive Systems Approach, Springer-Verlag London Limited, 2007.

19. Yoshihiro Sakayanagi, Daisuke Nakayama, Shigeki Nakaura, Mitsuji Sampe. Clarification of Free Parameters of State-dependent Coefficient Form: Effect on Solving State-dependent Riccati Inequality, *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul*, Korea, July 6–11, 2008.

20. **Kabanov A. A.** Approximate feedback linearization based on the singular perturbations approach, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2015, 16(8):515–522 (in Russian), https://doi.org/10.17587/mau.16.515-522.

21. **Afanas'ev V. N.** Guaranteed Control of a Nonlinear Plant (as Exemplified by a Heavy Water Nuclear Reactor), *Mekhatro-nika, avtomatizaciya, upravlenie*, 2013, no. 5, pp. 2–4 (in Russian).

# АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

#### УДК 004.621.391:004

#### DOI: 10.17587/mau.21.675-681

**Г. А. Гулуев,** д-р техн. наук, scb\_06@mail.ru, **Ас. Г. Рзаев,** д-р техн. наук, asifrzayev48@gmail.com, **Ф. Г. Пашаев,** д-р техн. наук, pasha.farhad@gmail.com,

Институт систем управления Национальной Академии наук Азербайджана, г. Баку

# Анализ процессов механизированной добычи нефти методами теории электрических цепей

Исследованы проблемы развития нефтегазового комплекса на последнем этапе эксплуатации, когда добыча нефти осуществляется механизированными способами. Описаны основные способы механизированной добычи в РФ и США. Особое внимание уделяется большой обводненности продукции на этой стадии добычи нефти. Проведен литературный обзор рассматриваемой проблемы и поставлена задача анализа и построения моделей процессов добычи нефти на стадии эксплуатации скважин механизированными способами с применением теории электрических цепей в целях рационального комплексного управления всеми процессами. Описывается типовая технологическая схема процесса добычи нефти механизированными способами. Обсуждается подобие технологических процессов добычи нефти процессам в электрических цепях: процесс закачки очищенной пластовой воды в нагнетательные скважины посредством блочных кустовых насосных станций (БКНС) установок подобен процессу подпитки аккумуляторной батареи с помощью генератора электроэнергии; процесс заполнения добывающей скважины вытесненной из пласта газожидкостной смесью под давлением нагнетательных скважин подобен процессу заряда конденсатора от аккумуляторной батареи; процесс подъема жидкости из добывающих скважин с помощью насосов добычи — процессу разрядки конденсатора на активную нагрузку. Приведена упрощенная электрическая схема типовой технологической схемы процессов добычи нефти на этой стадии. По приведенной электрической схеме замещения технологических процессов согласно законам теоретической электротехники построены модели процессов заряда аккумуляторной батареи, заряда и разряда конденсатора. Приведена таблица соответствия параметров технологических и электрических схем, на основе которой предложены упрощенные модели процессов закачки очищенной пластовой воды в нагнетательные скважины посредством БКНС, заполнения добывающей скважины под давлением нагнетательной скважины, подъема жидкости из добывающих скважин посредством насосов откачки, и условия, при которых достигаются различные режимы работы процессов механизированного способа добычи нефти.

Ключевые слова: добыча нефти, процесс, электрические цепи, давление, напряжение, расход, ток, скважина, модель

#### Введение

Согласно Энергетической стратегии Российской Федерации до 2030 г. [1] одной из основных проблем развития нефтегазового комплекса является нерациональное недропользование, так как в основном все промыслы истощены, и нефтедобыча перешла на свой последний этап эксплуатации — стадию эксплуатации скважин механизированными способами. Для достижения стратегических целей развития отрасли необходима разработка и внедрение современных методов увеличения нефтеотдачи [2-4]. Следует отметить, что данная проблема является актуальной не только для России (коэффициент извлечения нефти в 2008 г. составил 30 %), но и для основных нефтедобывающих стран, где средняя проектная нефтеотдача составляет также около 30 % [5, 6].

Основным способом механизированной добычи является применение штанговых глубинно-насосных установок (ШГНУ) и погружных электроцентробежных насосов (ЭЦН). Так, в РФ на 41 % скважин эксплуатируется ШГНУ и на 54 % — ЭЦН [7]. Публикуемые данные свидетельствуют о том, что более 85 % скважин с механизированной добычей в США оснащены ШГНУ [8, 9]. ШГНУ является одним из самых универсальных способов механизированной добычи нефти. ШГНУ столь популярны из-за своей простоты, надежности и возможности применения в широком диапазоне условий эксплуатации.

При механизированной добыче нефти используются скважинные насосы трех основных типов: штанговые глубинные (ШГН), электроцентробежный (ЭЦН) и вставные (ВН) насосы. Применяются также насосы других типов: диафрагменные, инжекторные, вибрационные, гидропоршневые, но они распространены значительно реже, и их доля в общем энергопотреблении ничтожно мала [10].

Современное состояние нефтедобывающей отрасли характеризуется тем, что большинство нефтедобывающих производств относятся к промыслам в поздней стадии эксплуатации, отличающимся повышенной обводненностью продукции за счет закачки воды в пласт для поддержания пластового давления. Высокая обводненность продукции увеличивает стоимость добычи и приводит к коррозии трубопроводов и аппаратуры [11]. Так, например, в США обводненность нефти составляет порядка 90 % [12], тогда как на некоторых месторождениях мира эта цифра достигает 98 %. Средняя обводненность в РФ составляет порядка 86 % [13].

В течение последних десятилетий основным методом воздействия на пласты большинства месторождений является метод заводнения пластов [14—16], который характеризуется значительными объемами закачки волы в пласт. В результате применения заводнения в пласте формируются два типа остаточной нефти. Первый тип остаточной нефти образуется в промытых водой зонах нефтяного пласта и содержит большее количество тяжелых компонентов (смол, асфальтенов), чем исходная нефть [17]. Положение флюидов в поровом пространстве определяется смачиваемостью породы [18, 19]. Причинами образования остаточной нефти первого типа являются высокое межфазное натяжение на границе раздела вода-нефть-порода и огромная суммарная поверхность контакта нефти с породой [20].

Второй тип остаточной нефти мало отличается от исходной нефти месторождения, так как образуется в результате неполного вытеснения нефти из неоднородного коллектора. Причинами формирования остаточной нефти второго типа являются неоднородное строение породыколлектора (наличие зон с различной проницаемостью), а также различные скорости фильтрации вытесняемого и вытесняющего флюидов [18, К остаточной нефти второго типа относится [20, 22]: нефть, остающаяся в слабопроницаемых поропластах и участках, не охваченных водой (27 %); нефть в застойных зонах однородных пластов (19 %); нефть, остающаяся в линзах и у непроницаемых экранов, не вскрытых скважинами (24 %). Таким образом, остаточная нефть второго типа является основным резервом при увеличении охвата пласта заводнением.

Отбор пластовой воды из залежей часто в десятки раз превышает текущий отбор нефти. В этих условиях регулирование закачки воды и отбора жидкости, чтобы не закачивать лишний объем воды в пласт и не извлекать из пласта попутной воды, которая не совершает полезной работы по вытеснению нефти, становится одной из наиболее актуальных и значимых задач [23].

Для регулирования процессов закачки воды в пласт и отбора жидкости из добывающих скважин необходимо иметь модель указанных процессов. Имея модель процессов, можно ставить задачи управления процессами.

#### Постановка задачи

Имеются различные модели [23—25], описывающие отдельные процессы нефтедобычи. Например, в работе [24, стр. 164—169] объем максимально возможного отбора жидкости из скважины при сохранении достаточной надежности работы насосного оборудования определяют из условия совместной работы системы пласт—насос—лифт:

$$Q_{\pi p} = K_{\pi p o \pi} (P_{\kappa o \pi} - P_{3a\delta});$$
  

$$Q_{\phi, \text{Hac}} = f(H, \Delta L, q_{\pi}, \eta),$$
(1)

где  $Q_{\rm пр}$  — приток жидкости из пласта к скважине;  $K_{\rm прод}$  — коэффициент продуктивности скважины;  $P_{\rm кон}$  — контурное давление;  $P_{\rm заб}$  забойное давление;  $Q_{\phi,\rm нас}$  — фактическая подача насоса; H — глубина спуска насоса по вертикали;  $\Delta L$  — удлинение ствола скважины в месте подвески насоса (для наклонных скважин);  $q_{\rm T}$  — теоретическая подача насоса;  $\eta$  коэффициент подачи насоса.

Для прогнозирования количества отбора жидкости из скважины решают систему уравнений (1), первое из которых описывает приток жидкости из пласта, а второе — подачу насосной установки. Ясно, что количество отбираемой общей жидкости  $Q_{\text{об.ж}}$  зависит от значения притока жидкости к скважине  $Q_{\text{пр}}$  и фактической подачи насоса  $Q_{\text{ф.нас}}$ :

$$Q_{\text{ob.},\text{m}} = f(Q_{\text{mp}}, Q_{\phi,\text{Hac}}).$$

В заводненных месторождениях особенное значение имеет объем добываемой нефти, а не общей жидкости. Однако при больших притоках пластовой жидкости к скважине содержание нефти в ее составе существенно уменьшается, что приводит к неэффективным затратам электроэнергии и ресурсов оборудования и к добыче дополнительной воды. Для устранения этого недостатка в работе [22] предложено управлять отбором жидкости так, чтобы повысить количество отбираемой нефти в составе общей жидкости:

$$Q_{\rm H} = Q_{\rm ob.w} K_{\rm H},$$

где  $K_{\rm H}$  — доля нефти в общей жидкости.

Однако эти модели являются частными и не описывают вес процесс нефтедобычи в поздней стадии эксплуатации месторождения. В результате построенные модели не адекватно описывают весь процесс нефтедобычи. В данной статье для устранения этого недостатка и упрощения построения моделей процессов нефтедобычи ставится задача сравнительного анализа технологических процессов с хорошо изученными электрическими аналогами.

#### Решение задачи

Известна типовая технологическая схема процесса нефтедобычи в поздней стадии эксплуатации месторождений (рис. 1, см. третью сторону обложки), где газожидкостная смесь (1) из скважины (2) с помощью насосов добычи (3) поднимается на поверхность и по выкидным линиям (4) направляется в автоматизированные групповые замерные установки (5) для определения количества добываемой продукции по каждой скважине. После замера продукция скважин транспортируется по сборным коллекторам (6) до сепаратора (7). На сепараторе происходит первичное отделение газа (8). Частично разгазированная жилкость (9) с сепаратора поступает на установку предварительного сброса воды (УПСВ) (10) для сброса подтоварной воды из пластовой жидкости.

Пластовая вода, отделившаяся в аппаратах УПСВ (10) по водоводам (11) через установки песколовки (12) и нефтеловушки (13) поступает в блочные кустовые насосные станции (БКНС) (14), с помощью которых через нагнетательные скважины (15) закачивается в пласт (16). Под давлением воды в продуктивных горизонтах вытесняется газожидкостная смесь из пласта в добывающую скважину.

Для анализа технологической схемы добычи нефти механическими способами и построения модели технологических процессов воспользуемся их подобием процессам в электрических цепях. Так, процесс закачки очищенной пластовой воды в нагнетательные скважины посредством БКНС подобен процессу подпитки аккумуляторной батареи с помощью генератора электроэнергии. Процесс заполнения добывающей скважины вытесненной из пласта газожилкостной смесью под давлением нагнетательных скважин подобен процессу заряда конденсатора от аккумуляторной батареи. Процесс подъема жидкости из добывающих скважин с помощью насосов добычи подобен процессу разрядки конденсатора на активную нагрузку. Учитывая то обстоятельство, что указанные процессы происходят последовательно, электрическую схему замещения нефтедобычи механическими способами для одной нагнетательной и группы добывающих скважин можно представить в виде, показанном на рис. 2.

Здесь для простоты схемы замещения мы ограничились одной нагнетательной скважиной, а в действительности к точкам a и  $\delta$  притекают жидкости под давлением и других нагнетательных скважин.

Схема состоит из генератора электроэнергии (Г) с выходной электродвижущей силой Е,



Рис.2. Электрическая схема замещения нефтедобычи в поздней стадии эксплуатации месторождения Fig. 2. Equivalent electrical circuit of oil production in the late

Fig. 2. Equivalent electrical circuit of oil production in the late stage of field development

ключа (K<sub>1</sub>), электрического диода (Д), аккумуляторной батареи (АБ) с емкостью  $C_{A\overline{b}}$ , сопротивления заряда аккумуляторной батареи ( $R_{3.A\overline{b}}$ ), сопротивления заряда ( $R_{3.1}, ..., R_{3.n}$ ) конденсаторов  $C_1, ..., C_n$ , ключей (K<sub>2.1</sub>, ..., K<sub>2.n</sub>), сопротивления разряда ( $R_{p.1}, ..., R_{p.n}$ ) конденсаторов  $C_1, ..., C_n$ . В схеме  $i_1$  — сила тока заряда АБ;  $i_{3.1}, ..., i_{3.n}$  — силы тока заряда конденсаторов  $C_1, ..., C_n$ .

Соответствие параметров технологического процесса нефтедобычи параметрам ее электрической схемы замещения приведены в таблице.

В схеме можно выделить три контура. В первом контуре происходит заряд аккумуляторной батареи, во втором — заряд конденсатора под напряжением аккумуляторной батареи, в третьем — разряд конденсатора на активную нагрузку. Контуры  $II_1$ , ...,  $II_n$  и  $III_1$ , ...,  $III_n$  относятся к добывающим скважинам, число которых обычно в несколько раз больше, чем нагнетательных.

Обратимся к некоторым результатам из теоретических основ электротехники [26, с. 332—335].

Напряжение между обкладками конденсатора при зарядке изменяется по следующему закону:

$$U_{c} = U - U\mathbf{e}^{-\frac{t}{\tau}} = U(1 - \mathbf{e}^{-\frac{t}{\tau}}), \qquad (2)$$

где  $U_c$  — напряжение на обкладках конденсатора; U — напряжение зарядного устройства; t — текущее время;  $\tau = rC$  — постоянная времени заряда конденсатора.

Зарядный ток, который проходит по сопротивлению, определяется следующим равенством:

$$i_3 = \frac{U}{r} \mathbf{e}^{-\frac{t}{\tau}},\tag{3}$$

причем в момент включения зарядный ток имеет максимальное значение I = U/r и с тече-

#### Соответствие параметров технологического процесса нефтедобычи параметрам ее электрической схемы замещения

#### Compliance of the parameters of the technological process of oil production with the parameters of its electrical equivalent circuit

Параметры технологического процесса нефтедобычи	Параметры электрической схемы замещения
Р <sub>БКНС</sub> — давление на выходе БКНС БКНС Вентиль Обратный клапан	<ul> <li>Е — электродвижущая сила генератора</li> <li>Г — генератор</li> <li>К<sub>1</sub> — переключатель</li> <li>Д — электрический диод</li> </ul>
$P_{\rm HC}$ — давление нагнетательной скважины $Q_{\rm B}$ — расход воды в нагнетательной скважине $R_{\rm 5KHC}$ — сопротивление нагнетательной скважины $R_{\rm acj}$ — общее сопротивление пласта от нагнетательных скважин до <i>j</i> -й добывающей скважины	$U_{\rm Ab}$ — напряжение аккумуляторной батареи $i_1$ — сила тока заряда аккумуляторной батареи $R_{3,\rm Ab}$ — сопротивление заряда аккумуляторной батареи $R_{3j}$ — сопротивление заряда <i>j</i> -го конденсатора
$Q_{\text{пр}j}$ — приток пластовой жидкости к <i>j</i> -й добывающей скважине $P_{\text{от,дс}j}$ — давление при отборе жидкости из <i>j</i> -й добывающей скважины $V_{\text{ДC}j}$ — объем <i>j</i> -й добывающей скважины $K_{2,1}$ ,, $K_{2n}$ — ключ, вкл./откл., насоса откачки добывающих скважин 1,, $n$ $Q_{\text{от}j}$ — производительность насоса откачки <i>j</i> -й добывающей скважины $R_{\text{от}j}$ — сопротивление на выходе <i>j</i> -го насоса откачки $P_{0\text{дс}j}$ — давление <i>j</i> -й добывающей скважины отбора жидкости	$i_{3j}$ — сила тока заряда <i>j</i> -го конденсатора $U_{cj}$ — напряжение заряда <i>j</i> -го конденсатора $C_j$ — емкость <i>j</i> -го конденсатора $K_{2.1}$ ,, $K_{2n}$ — переключатель разряда конденса- торов $i_{pj}$ — сила тока разряда <i>j</i> -го конденсатора $R_{pj}$ — сопротивление разряда <i>j</i> -го конденсатора $U_{0j}$ — напряжение на <i>j</i> -м конденсаторе до на- чало его разряда

нием времени постепенно уменьшается, стремясь к нулю.

За время  $t = \tau$  зарядный ток уменьшается в е  $\approx 2,72$  раз:

$$i_3 = \frac{U}{r\mathbf{e}} \approx \frac{1}{2,72} I = 0,37I$$

а напряжение на конденсаторе за это же время возрастает от 0 до 0,63U:

$$U_c = U\left(1 - \frac{1}{\mathbf{e}}\right) \approx 0,63U$$

Напряжение на электродах конденсатора при его разрядке изменяется по закону

$$U_c = U \mathbf{e}^{-\frac{t}{\tau}}.$$
 (4)

Разрядный ток определяется равенством

$$i_p = \frac{U_c}{r} = \frac{U}{r} \mathbf{e}^{-\frac{t}{\tau}}$$
(5)

и изменяется пропорционально напряжению на обкладках, причем максимальное значение он имеет в начальный момент (при t = 0):

$$i_{\text{p.max}} = \frac{U}{r} = I.$$

Перепишем формулы (2)—(5) для контуров на рис. 2.

 Для контура І<sub>1</sub> напряжения на зажимах аккумуляторной батареи и зарядный ток i<sub>3.АБ</sub> аккумуляторной батареи определяются равенствами

$$U_{\rm AB}(t) = E(1 - {\bf e}^{-\frac{t}{\tau_1}});$$
 (6)

$$i_1(t) = \frac{E}{R_{3.AB}} \mathbf{e}^{-\frac{t}{\tau_1}},\tag{7}$$

где  $\tau_1 = R_{3.AB}C_{AB}$  — постоянная времени заряда аккумуляторной батареи через сопротивление  $R_{3.AB}$ .

На рис. 3 (см. третью сторону обложки) приведены графики изменения напряжения и силы тока заряда аккумуляторной батареи согласно формулам (6) и (7). Необходимо отметить, что аккумуляторная батарея при такой схеме подпитки всегда имеет остаточное напряжение. Вследствие этого в зависимости от установленных режимов подзаряда с помощью генератора и разрядки на конденсаторы  $C_1$ , ...,  $C_n$  напряжение  $U_{AB}(t)$  на зажимах аккумуляторной батареи и зарядный ток  $i_i(t)$  находятся в следующих пределах:

$$0 \leq U_{AB}(t) \leq U_{AB \max}, 0 \leq i_1(t) \leq i_{3,\max}.$$

Как следует из рис. 2, значения  $U_{AB}(t)$  и  $i_1(t)$  без учета притоков от других аккумуляторов в точки *а* и *б* зависят от параметра

$$\alpha_1 = \frac{i_1}{\sum_{j=1}^n i_{3j}}.$$

Справедливы следующие соотношения:

— при  $\alpha_1 > 1$  напряжение  $U_{AB}(t)$  возрастает, а сила тока  $i_1(t)$  убывает;

— при  $\alpha_1 = 1$  напряжение  $U_{AB}(t)$  и сила тока  $i_1(t)$  имеют постоянные значения;

— при  $\alpha_1 < 1$  напряжение  $U_{AB}(t)$  убывает, а сила тока  $i_1(t)$  возрастает.

Следовательно, управляя значением  $\alpha_1$ , можно достичь необходимого режима работы  $I_1$ -го кон-

тура схемы замещения. Режим работы на рис. 3 (см. третью сторону обложки) выражается смещением тонкой линии параллельно оси  $U_{\rm AE}$ ,  $i_1$ .

 Для контура II<sub>j</sub> напряжение и зарядный ток на конденсаторе C<sub>j</sub> при зарядке имеют вид

$$U_{\rm cj}(t) = U_{\rm AB}(1 - \mathbf{e}^{-\frac{t}{\tau_{3j}}}); \tag{8}$$

$$i_{3j}(t) = \frac{U_{AB}}{R_{3i}} \mathbf{e}^{-\frac{t}{\tau_{3j}}},\tag{9}$$

где  $t_{3j} = R_{3j}C_j$  — постоянная времени заряда конденсатора через сопротивление заряда  $R_{3j}$ .

В результате аналогичных рассуждений для контура II<sub>i</sub> получим:

$$0 \leq U_{cj}(t) \leq U_{cj \max}, 0 \leq i_{3j}(t) \leq i_{3j \max}.$$

Согласно рис. 2 значения  $U_{cj}$  и  $i_{3j}$  зависят от соотношения токов заряда и разряда конденсатора  $C_j$ :

$$\alpha_{3j} = \frac{i_{3j}}{i_{nj}}$$

Нетрудно убедиться, что:

— при  $\alpha_{3j} \ge 1 U_{cj}(t)$  возрастает, а  $i_{3j}(t)$  убывает; — при  $\alpha_{3j} = 1 U_{cj}(t)$  и  $i_{3j}(t)$  имеют постоянное значение;

— при  $\alpha_{3j} < 1 U_{cj}(t)$  убывает, а  $i_{3j}(t)$  возрастает. Управляя значением  $\alpha_{3j}$ , можно достичь необходимого режима работы контура  $II_j$  схемы замещения, т. е. конденсатора.

 Для контура III<sub>j</sub> напряжение при разрядке конденсатора C<sub>i</sub> и его разрядный ток имеют вид

$$U_{cj}(t) = U_{0j}(1 - \mathbf{e}^{-\frac{t}{\tau_{pj}}});$$
(10)

$$i_{pj}(t) = \frac{U_{0j}}{R_{pj}} e^{-\frac{t}{\tau_{pj}}},$$
 (11)

где  $\tau_{pj} = R_{pj}C_j$  — постоянная времени, характеризующая разряд конденсатора  $C_j$  на сопротивление;  $U_{0j}$  — напряжение на конденсаторе  $C_j$  до начала его разряда.

На рис. 4 (см. третью сторону обложки) приведены графики изменения напряжения и силы тока разрядки конденсатора согласно формулам (10) и (11).

С учетом таблицы соответствия параметров технологического процесса нефтедобычи процессам в электрических цепях, схемы ее замещения (см. рис. 2) и формул (6)—(11) для процессов нефтедобычи легко можно составить соответствующие выражения и графики изменения давления и расхода воды в нагнетательной скважине, изменения давления и притока жидкости к *j*-й добывающей скважине и изменения давления и отбора жидкости из *j*-й добывающей скважины.

Для процесса закачки очищенной пластовой воды в нагнетательные скважины посредством БКНС имеем следующие выражения для расчета давления в них и расхода воды, поступающей к ним:

$$P_{\rm HC}(t) = P_{\rm 5KHC}(1 - {\bf e}^{-\frac{t}{\tau_{\rm HC}}}); \qquad (12)$$

$$Q_{\rm B}(t) = \frac{P_{\rm 5KHC}}{R_{\rm HC}} {\bf e}^{-\frac{t}{\tau_{\rm HC}}}, \qquad (13)$$

где  $\tau_{\rm HC} = R_{\rm HC}C_{\rm HC}$  — постоянная времени наполнения нагнетательной скважины под давлением на выходе БКНС.

Для процесса заполнения добывающей скважины, вытесненной из пласта газожидкостной смесью под давлением нагнетательных скважин, имеем следующие выражения для давления при заполнении *j*-й добывающей скважины и притока жидкости к ней:

$$P_{\text{ot.gc}j}(t) = P_{\text{HC}}(1 - \mathbf{e}^{-\frac{t}{\tau_{3,\text{gc}j}}}); \qquad (14)$$

$$Q_{\pi pj}(t) = \frac{P_{\rm HC}}{R_{\pi cj}} e^{-\frac{t}{\tau_{3.\pi cj}}}.$$
 (15)

Здесь  $t_{3j} = R_{\text{дс}j}V_{\text{дс}j}$  — постоянная времени наполнения добывающей скважины под давлением пластовой жидкости;  $R_{\text{дс}j}$  — общее сопротивление пласта от нагнетательных скважин до *j*-й добывающей скважины;  $V_{\text{дс}j}$  — объем *j*-й добывающей скважины.

Для процесса отбора жидкости из добывающих скважин с помощью насосов добычи имеем следующие выражения для давления из *j*-й добывающей скважины и отбора жидкости из нее:

$$P_{\text{ot.},\text{gc}j}(t) = P_{0 \text{gc}j}(1 - \mathbf{e}^{-\tau_{\text{ot.},\text{gc}j}}); \quad (16)$$

$$Q_{\text{otj}}(t) = \frac{P_{0,\text{acj}}}{R_{\text{otj}}} \mathbf{e}^{-\frac{1}{\tau_{\text{ot.acj}}}}.$$
 (17)

Здесь  $\tau_{\text{от.},jj} = R_{\text{от}j}V_{\text{лс}j}$  — постоянная времени, характеризующая отбор жидкости из добывающей скважины с помощью насосов добычи;  $R_{\text{от}j}$  — сопротивление на выходе *j*-го насоса откачки;  $V_{\text{лс}j}$  — объем *j*-й добывающей скважины, а  $P_{0\text{лс}j}$  — давление в ней до начала отбора жидкости.

#### Заключение

Результаты анализа процессов механизированной добычи нефти методами теории электрических цепей показали: 1. Технологические процессы: закачка воды в нагнетательные скважины посредством БКНС; заполнение добывающей скважины вытесненной из пласта газожидкостной смесью под давлением нагнетательных скважин; подъем жидкости из добывающих скважин с помощью насосов добычи аналогичны соответствующим электрическим процессам — заряду аккумуляторной батареи от генератора, заряду конденсатора от аккумуляторной батареи и разряду конденсатора на активную нагрузку.

2. Использование электрических аналогов технологических процессов упрощает процедуру построения моделей и повышает их адекватность.

#### Список литературы

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. URL: http://minenergo.gov.ru/activity/energostrategy.

2. Ибатуллин Р. Р., Ибрагимов Н. Г., Тахаутдинов Ш. Ф., Хисамов Р. С. Увеличение нефтеотдачи на поздней стадии разработки месторождений. М.: Недра, 2004. 292 с.

3. Anand A., Ismali A. De-Risking Polymer Flooding of High Viscosity Oil Clastic Reservoirs — A Polymer Trial in Oman. Paper SPE 181582 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Dubai, UAE, 26-28 September 2016.

4. Al-Kalbani H., Mandhari M. S., Al-Hadrami H., et al. Treating Back Produced Polymer to Enable Use of Conventional Water Treatment Technologies. Paper SPE 169719 presented at the SPE EOR Conference at Oil and Gas West Asia held in Muscat, Oman, 31 March – 2 April 2014.

5. **Крянев Д. Ю., Жданов С. А.** Применение методов увеличения нефтеотдачи пластов в России и за рубежом // Бурение и нефть. 2011. № 2. С. 22–26.

6. Jouenne S., Klimenko A., Levitt D. Polymer Flooding: Establishing Specifications for Dissolved Oxygen and Iron in Injection Water. Paper SPE179614 presented at the SPE Improved Oil Recovery Conference held in Tulsa, Oklahoma, USA, 11–13 April 2016.

7. Маркетинговое исследование рынка установок штанговых глубинных насосов. (2010) Аналитический отчет. Research.Techart.: [электронный pecypc]. URL: http://www. techart.ru/files/research/walking-beam-pumping-unit.pdf.

8. Neely A. B., Tolbert H. E. *Experience* with *Pump-Off Control* in the Permian Basin, *"SPE Paper* No. *14345*, *SPE* Technical Conference and Journal of Petroleum Technology, May, 1988. P. 645–648.

9. Neely A. B., Gibbs S. G. Computer Diagnosis of Downhole Conditionis in Soker Rod Pumping Wells // Journal of Petroleum Technology, January 1966, P. 91.

10. Хакимьянов М. И. Автоматизация управления системами электроснабжения: Электронное учебное пособие. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2011. 91 с. 11. Грайфер В. И., Галустянц В. А., Виницкий М. М. Методология и практика управления инновационной деятельностью (на примере нефтедобывающей промышленности): Монография. М.: ГУЛ Изд-во "Нефть и газ" РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2002. 350 с.

12. Karmakar G. P., Chandrima Chacraborty. Improved oil recovery using polymer gelants: a review // Indian Journal of Chemical Technology. 2006. № 13. P. 162–167.

13. Коршак А. А., Шаммазов А. М. Основы нефтегазового дела. Уфа: ООО "Дизайн Полиграф Сервис", 2001.

14. Горбатиков В. А., Пальянов А. П. Модернизация систем ППД // Нефтяное хозяйство. 2000. № 10. С. 82-83.

15. Carlos A. Roscha, C. Stanley McCool, Stephen J. Randtke, Lanny G. Schoeling, M. Sophocleous. The use of gelled polymer technology for the containment groundwater. URL: http://info. ngwa.org/gwol/pdf/890149595.PDF.

16. **Ильясов Б. Г., Шаньгин Е. С., Тагирова К. Ф., Танеев А. Р.** Система автоматического управления добычей нефти из малодебитных скважин // Нефтепромысловое дело. 2004. № 8. С. 28–32.

17. Демахин С. А., Демахин А. Г. Селективные методы изоляции водопритока в нефтяные скважины. Саратов: Изд-во Гос.УНЦ "Колледж", 2003. 164 с.

18. Alvarado V., Manrique E. Enhanced oil recovery: an update review // Energies. 2010. № 3. P. 1529–1575.

19. Gurgel A., Moura M. C.P. A., Dantas T. N.C., Barros Neto E. L., Dantas Neto A. A. Review on chemical flooding methods applied in enhanced oil recovery // Brazilian Journal of Petroleum and Gas. 2008.  $\mathbb{N}$  2. P. 83–95.

20. Thomas S., Farouq Ali S. M. Status and Assessment of Chemical Oil Recovery Methods // Energy Sources. 1999. No 21. P. 177–189.

21. Сладовская О. Ю., Куряшов Д. А., Лахова А. И., Мингазов Р. Р., Исмагилов И. Ф., Вагапов Б. Р. Применение коллоидных систем для увеличения нефтеотдачи пластов // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 10. С. 585—591.

22. Altunina L. K., Kuvshinov V. A. Stasyeva L. A. Progress in Mining and Oilfield Chemistry. Vol. 2. Acad. Kiado, Budapest, 2000. P. 117.

23. Белов В. Г., Иванов В. А., Мусаев Х. Ц., Соловьев В. Я. Определение оптимальных эксплуатационных параметров системы нефтяной пласт-скважина-насос // Нефтяное хозяйство. 2004. № 7. С. 100—102.

24. Андреев В. В., Уразаков К. Р., Далимов В. У. и др. Справочник по добыче нефти / Под ред. К. Р. Уразакова. М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2000. 374 с.

25. Рзаев Ас. Г. Управление нефтедобычи в поздней стадии эксплуатации месторождения. // 19 Международная научно-практическая конференция: "Научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке". Россия, Москва. 2015. С. 35—39.

26. Нейман Л. Р., Демирчиян К. С. Теоретические основы электротехники: В 2-х т. Т. 1. Л.: Энергоиздат. Ленинградское издание, 1981. 536 с.

# Analysis of Processes Mechanized Oil Mining with the Methods Theory of Electrical Circuits

G. A. Guluyev, scb\_06@mail.ru, As. H. Rzayev, asifrzayev48@gmail.com,

F. H. Pashyev, pasha.farhad@gmail.com,

Institute of Control Systems (Azerbaijan National Academy of Sciences), Baku, Az-1141, Azerbaijan

Corresponding author: Guluyev Gambar A., Institute of Control Systems, Baku, Az-1141, Azerbaijan, e-mail: scb\_06@mail.ru Accepted on May 20, 2020

#### Abstract

The authors investigate the problems of the development of the oil and gas complex at the last stage of operation, when oil is extracted by lifting. The main methods of lifting employed in the Russian Federation and the USA are described. A particu-

lar focus is placed on large water cuts at this stage of oil production. Literature on the issue under investigation is reviewed and the problem is set to analyze and construct models of oil production processes at the stage of well operation by lifting methods using network analysis (electrical circuits) in order to rationally manage all processes comprehensively. A typical flow chart of the oil production process by lifting methods is described. Technological processes of oil production are compared to processes in electric circuits. Thus the process of pumping purified formation water into injection wells by means of block cluster pumping units is similar to the process of recharging a battery using an electric power generator. The process of filling a production well with gas-liquid mixture displaced from the formation under pressure of injection wells is similar to the process of charging a capacitor from a battery, the process of lifting liquid from production wells using production pumps — to the processes at this stage is given. Based on the given equivalent electrical circuit of technological processes, according to the laws of theoretical electrical engineering, models of the battery charging, capacitor charging and discharging processes are built. The table of correspondence of the parameters of technological and electrical circuits is presented on the basis of which the authors propose simplified models of the processes of pumping purified formation water into injection wells using unit cluster pumping stations, of filling a production well under pressure of the injection well, lifting liquid from production wells using unit cluster pumping stations, of filling a production well under pressure of the injection well, lifting liquid from production wells by means of suction pumps and conditions under which various operating modes of lifting processes are achieved.

Keywords: oil production, process, electrical circuits, pressure, voltage, consumption, current, well, model

#### For citation:

Guluyev G. A., Rzayev As. H., Pashyev F. H. Analysis of Processes Mechanized Oil Mining with the Methods Theory of Electrical Circuits, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 12, pp. 675–681.

DOI: 10.17587/mau.21.675-681

#### References

1. The energy strategy of Russia for the period until 2030, available at: http://minenergo.gov.ru/activity/energostrategy.

2. Ibatullin R. R., Ibragimov N. G., Takhautdinov Sh. F., Khisamov R. S. Oil recovery at a late stage of field development, Moscow, Nedra, 2004, 292 p. (in Russian).

3. Anand A., Ismali A. De-Risking Polymer Flooding of High Viscosity Oil Clastic Reservoirs — A Polymer Trial in Oman, Paper SPE 181582 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Dubai, UAE, 26–28 September 2016.

4. Al Kalbani H., Mandhari M. S., Al-Hadrami H. et al. Treating Back Produced Polymer to Enable Use of Conventional Water Treatment Technologies, *Paper SPE 169719 presented at the SPE EOR Conference at Oil and Gas West Asia held in Muscat*, Oman, 31 March – 2 April 2014.

5. Kryanev D. Y., Zhdanov S. A. Application of enhanced oil recovery methods in Russia and abroad, *Burenie i Neft*, 2011, no. 2, pp. 22–26 (in Russian).

6. Jouenne S., Klimenko A., Levitt D. Polymer Flooding: Establishing Specifications for Dissolved Oxygen and Iron in Injection Water, *Paper SPE179614 presented at the SPE Improved Oil Recovery Conference held in Tulsa*, Oklahoma, USA, 11–13 April 2016.

7. **Market** research of sucker rod pumps. (2010) Analytical report. Research. Techart. available at: http://www.techart.ru/files/research/walking-beam-pumping-unit.pdf (in Russian).

8. Neely A. B., Tolbert, H. E. (1988) Experience with Pump-Off Control in the Permian Basin, *SPE Paper No. 14345, SPE Technical Conference and Journal of Petroleum Technology*, May, pp. 645–648.

9. Neely A. B., Gibbs S. G. Computer Diagnosis of Downhole Conditionis in Soker Rod Pumping Wells, *Journal of Petroleum Technology*, January 1966, pp. 91.

10. **Khakimyanov M. I.** Automation of management of power supply systems: an electronic textbook, Ufa, Publishing House of Ural State Technical University, 2011, 91 p. (in Russian).

11. Grayfer V. I., Galustyants V. A., Vinitskiy M. M. The methodology and practice of innovation management (case study of the oil industry), Moscow, GUL Neft i Gaz Publishing House of the Russian State University of Oil and Gas named after I. M. Gubkin, 2002, 350 p. (in Russian).

12. Karmakar G. P., Chandrima Chacraborty. Improved oil recovery using polymer gelants: a review, *Indian Journal of Chemical Technology*, 2006, no. 13, pp. 162–167.

13. Korshak A. A., Shammazov A. M. Basics of oil and gas business. Textbook for high schools, Ufa, Dizayn Poligraf Servis LLC, 2001 (in Russian).

17. **Gorbatikov V. A., Palyanov A. P.** Modernization of FPM systems, *Neftyanoye khozyaystvo*. Moscow, 2000, no. 10, pp. 82–83 (in Russian).

15. Carlos A. Roscha, C. Stanley McCool, Stephen J. Randtke, Lanny G. Schoeling, M. Sophocleous. The use of gelled polymer technology for the containment groundwater, available at: http:// info.ngwa.org/gwol/pdf/890149595.PDF.

16. Ilyasov B. G., Shangin E. S., Tagirova K. F., Taneyev A. R. System for automatic control of oil production from marginal wells, *Neftepromyslovoye delo*, 2004, no 8, pp. 28–32 (in Russian).

17. **Demakhin S. A., Demakhin A. G.** Selective methods for isolating water inflow into oil wells, Saratov, College Publishing House of the State Ural Science Center, 2003, 164 p. (in Russian).

18. Alvarado V., Manrique E. Enhanced oil recovery: an update review, *Energies*, 2010, no. 3, pp. 1529–1575.

19. Gurgel A., Moura M. C.P. A., Dantas T. N.C., Barros Neto E. L., Dantas Neto A. A. Review on chemical flooding methods applied in enhanced oil recovery, *Brazilian Journal of Petroleum and Gas*, 2008, no. 2, pp. 83–95.

20. Thomas S., Farouq Ali S. M. Status and Assessment of Chemical Oil Recovery Methods, *Energy Sources*, 1999, no. 21, pp. 177–189.

21. **The use** of colloidal systems to increase oil recovery / O. Yu. Sladovskaya, D. A. Kuryashov, A. I. Lakhova, R. R. Mingazov, I. F. Ismagilov, B. R. Vagapov, *Bulletin of Kazan Technological University*, 2010, no. 10, pp. 585–591 (in Russian).

22. Altunina L. Kuvshinov V. A., Stasyeva L. A. Progress in Mining and Oilfield Chemistry, 2000, vol. 2, Acad. Kiado, Budapest, p. 117.

23. Belov V. G., Ivanov V. A., Musayev Kh. T., Soloviev V. Y. Determining the optimal operational parameters of the oil reservoir-well-pump system, *Neftyanoye Khozyaystvo*, 2004, no. 7, pp. 100–102 (in Russian).

24. Andreev V. V., Urazakov K. R., Dalimov V. U. et al. Handbook of oil production, Moscow, Nedra-Biznestsentr LLC, 2000, 374 p. (in Russian).

25. **Rzayev As. G.** Oil production management in the late stage of field development, *19th International Scientific and Practical Conference: Scientific Review of Physical, Mathematical and Technical Sciences in the XXI Century Russia*, Moscow, 24–25 July 2015, pp. 35–39 (in Russian).

26. Neiman L. R., Demirchiyan K. S. Theoretical foundations of electrical engineering: in 2 volumes. Vol. 1, Leningrad, Energoizdat, Leningrad edition, 1981, 536 p. (in Russian).

С. П. Круглов, д-р техн. наук, проф., kruglov\_s\_p@mail.ru, Д. Н. Аксаментов, аспирант, Gaastra104@mail.ru, Иркутский государственный университет путей сообщения

# Метод адаптивного управления мостовым краном с прямым отслеживанием перемещения груза

Предлагается метод автоматического управления мостовым краном, нацеленный на непосредственное отслеживание горизонтального перемещения груза на заданной высоте в назначенную точку в условиях текущей априорной неопределенности параметров груза и внешних возмушений. К последним относятся воздействия ветра, изменения трения перемещения тележки крана и др. Рассматриваемый в статье подход заменяет решение двух традиционных задач: отслеживание перемещения тележки крана в заданную точку и демпфирование угловых колебаний груза. Кроме того, предлагаемый метод управления основан на схеме адаптивного управления, включающей идентификатор, неявную эталонную модель и использование "упрощенных" условий адаптируемости. Последние сводятся лишь к требованию сходимости невязки идентификации при функционировании алгоритма текущей идентификации и к выбору в определенном диапазоне постоянной оценки коэффициента при управлении. Эта оценка выбирается достаточно большой по модулю, чтобы обеспечить наибольший запас устойчивости замкнутой системы управления по амплитуде с обеспечением требуемого качества управления. Для текущей параметрической идентификации предлагается использовать рекуррентный метод наименьших квадратов с фактором забывания. Эталонная модель назначается в виде колебательного звена с собственной частотой, не превышающей таковую для объекта управления с неподвижным основанием и находящейся в экспериментально установленном диапазоне. Для уточнения собственной частоты эталона требуется оценка длины подвеса груза с точностью не хуже 30 %. Предложен простейший алгоритм для получения такой оценки. Он основан на средней скорости вертикального перемещения груза, которая, как правило, приблизительно известна. Приведены результаты компьютерных исследований эффективности предлагаемой адаптивной системы управления на основе параметров разработанной экспериментальной установки мостового крана с учетом характеристик типовых датчиков информации и приводов. Данный подход показал высокую эффективность в широком диапазоне вариантов груза и возмущений. Он может являться основой для создания реальных систем управления кранами любых типов, работающих с подвешенным грузом.

**Ключевые слова:** мостовой кран, демпфирование колебаний, алгоритм текущей идентификации, адаптивная система управления, закон управления, эталонная модель

#### Введение

Роль мостовых кранов в современной промышленности, транспорте и других областях сложно переоценить. Однако для повышения эффективности их использования требуется автоматизация, направленная на гашение маятниковых колебаний груза, парирование внешних возмущений, причем в условиях априорной неопределенности параметров объекта управления и возмущений. Решению этой актуальной задачи в разных ее постановках посвящено немалое число работ, например [1—17].

В статье [1] предлагается использовать модернизированный ПД регулятор с сигмоидальной функцией, в работе [2] — принцип модального управления, в статье [3] предполагается дополнительное устройство для гашения колебаний на основе настраиваемого ПИД регулятора. В работе [4] авторы предлагают формировать закон управления на основе заранее назначенной эталонной траектории перемещения груза. Однако эти и им подобные работы предполагают наличие априорной информации о параметрах крана и возмущений, либо об отсутствии последних. Известно, что данные регуляторы не обеспечивают должного качества управления при значительном многообразии вариантов груза, длины троса и внешних возмущений.

В работе [5] предлагается метод управления краном со свойствами робастности, однако он может иметь разное время сходимости процессов в замкнутой системе управления, что является критичным для практики. В работе [6] реализован метод управления с частичной адаптируемостью к весу переносимого груза, но он не решает задачу по адаптивному управлению в полном объеме. Много предлагаемых решений подразумевают предварительную настройку системы управления перед использованием крана, поэтому не способны обеспечить качественное парирование колебаний в условиях текущей априорной неопределенности (см., например, [7]).

Работы [8, 9] связаны с использованием нечеткого управления, которое не способно качественно решать задачу управления в условиях неконтролируемых возмущений. Имеются решения задачи управления кранами на основе скользящих режимов, в том числе, в сочетании с нечетким управлением и нейроконтроллерами, представленные например, в работах [10—12]. Данные системы отличаются робастными свойствами к переменным параметрам объекта и возмущениям, но связаны практически с постоянным возбужденным состоянием системы, что влечет дополнительные расходы на управление и быстрое расходование ресурса приводов.

Известны подходы с текущим оцениванием неизвестных параметров системы управления [13, 14]. Управление строится в два этапа: на первом формируется "Ŝ-траектория" тележки, на втором реализуется энергетически оптимальный адаптивный закон управления для реализации указанной траектории. Процедура синтеза закона управления использует градиентный алгоритм идентификации параметров закона, что является недостатком. Это связано с проблемами выбора параметров алгоритма идентификации для конкретных случаев, а также низкими идентифицирующими свойствами. Подобными свойствами обладает подход, рассмотренный в работе [15], предлагающий строить адаптивный закон управления краном на основе использования функции Ляпунова.

В работе [16] предлагается использовать адаптивную систему управления с идентификационным алгоритмом. С его помощью в начальный момент времени оцениваются параметры крана, затем строится закон управления с использованием функции Ляпунова. Поскольку идентификация параметров крана происходит только в начальный момент времени, закон управления не может учитывать текущую неопределенность.

Известно решение проблемы адаптивной автоматизации управления мостовым краном с текущей идентификацией параметров объекта управления, синтезом закона управления на основе этих оценок и заданной неявной эталонной модели [17]. Основой решения являются "упрощенные" условия адаптируемости [18]. Однако данная система управления основана на раздельном управлении тележкой мостового крана и угловым движением подвеса груза.

Настоящая работа является логическим продолжением работы [17] и увязывается с адаптивным отслеживанием непосредственно перемещения груза — одновременным решением задач перемещения груза на требуемое расстояние и гашения колебаний. Это упрощает построение адаптивной системы управления в условиях текущей априорной неопределенности, дает более качественное решение указанных задач.

#### Уравнение динамики объекта управления

Математическое описание мостового крана при перемещении груза по одной оси достаточно хорошо изучено в работе [5]. Схема этого движения представлена на рис. 1.

На рис. 1 введены следующие обозначения: тележка крана массой  $m_1$  с линейным перемещением по оси X; на тележку действует управляющая сила  $f_{ynp}$  и сила трения  $f_{Tp}$  (вязкое и сухое трение); груз массой  $m_2$  и центральным моментом инерции J; на груз действует гори-



Рис. 1. Схема движения крана по одной оси Fig. 1. The scheme of crane movement along one axis

зонтальная сила ветра  $f_{\text{вет}}$ ; груз связан с тележкой с помощью подвески — троса длиной l(будем считать l = const, максимальное значение этого параметра обозначим  $l_{\text{max}}$ );  $\phi$  — угол отклонения троса от вертикальной оси; x расстояние, пройденное тележкой;  $x_{\text{гр}}$  — расстояние, пройденное грузом в измерении по оси X; примем, что  $x_{\text{гр}}$  измеряется при максимальной длине подвески:  $l = l_{\text{max}}$ .

Если не учитывать массу троса и трение углового перемещения в силу их малости, а также начальные значения переменных по положению и скорости, уравнения поступательного и вращательного движения системы "тележка—груз" можно представить в виде [5]

$$\begin{cases} (m_{1} + m_{2})\ddot{x} + (m_{2}l\cos\phi)\ddot{\phi} = \\ = f_{y_{\Pi p}} + m_{2}l\dot{\phi}^{2}\sin\phi - k_{x}\dot{x} - f_{c.Tp}; \\ (m_{2}l\cos\phi)\ddot{x} + (m_{2}l^{2} + J)\ddot{\phi} = \\ = -m_{2}gl\sin\phi - lf_{BeT}\cos\phi; \\ x_{rp} = x + l_{max}\sin\phi, \end{cases}$$
(1)

где g — ускорение свободного падения; производные переменных взяты по времени t;  $f_{\rm c.тp}$  — сила сухого трения;  $k_x$  — коэффициент вязкого трения линейного перемещения тележки; указанные параметры в общем случае являются заранее неизвестными и, возможно, переменными (за исключением g,  $m_1$ ,  $l_{\rm max}$ ).

Учитывая небольшие углы отклонения груза (типовое значение  $|\phi| < 30^{\circ}$ ), малую скорость углового перемещения и физические законы движения, примем следующие упрощения:  $\sin\phi \approx \phi$ ,  $\cos\phi \approx 1$ ,  $\dot{\phi}^2 \sin\phi \approx 0$ . С учетом этого систему (1) перепишем относительно переменных  $\ddot{x}$ ,  $\dot{\phi}$  и  $x_{rp}$  в виде [17]

$$\begin{cases} \ddot{x} \approx a_{x1} f_{y\Pi p} + a_{x2} \phi + a_{x3} \dot{x} + a_{x4}; \\ \ddot{\phi} \approx a_{\phi 1} f_{y\Pi p} + a_{\phi 2} \phi + a_{\phi 3} \dot{x} + a_{\phi 4}; \\ x_{\Gamma p} \approx x + l_{\max} \phi, \end{cases}$$
(2)

$$\begin{split} a_{x1} &\triangleq \gamma^{-1} (m_2 l^2 + J); \ a_{x2} &\triangleq \gamma^{-1} g(m_2 l)^2; \\ a_{x3} &\triangleq -\gamma^{-1} (m_2 l^2 + J) k_x; \\ a_{x4} &\triangleq \gamma^{-1} [-(m_2 l^2 + J) f_{\text{c.Tp}} + m_2 l^2 f_{\text{BeT}}]; \\ a_{\phi 1} &\triangleq -\gamma^{-1} m_2 l; \ a_{\phi 2} &\triangleq -\gamma^{-1} (m_1 + m_2) m_2 g l; \\ a_{\phi 3} &\triangleq \gamma^{-1} m_2 l k_x; \\ a_{\phi 4} &\triangleq \gamma^{-1} l [m_2 f_{\text{c.Tp}} - (m_1 + m_2) f_{\text{BeT}}]; \\ \gamma &\triangleq [m_1 m_2 l^2 + (m_1 + m_2) J]. \end{split}$$

Приближенное описание динамики в виде (2) обосновано также использованием последующей аппроксимации (2) и (1) за счет оценок параметров, доставляемых алгоритмом текущей идентификации.

Последнее из равенств (2) можно записать в виде

$$\ddot{x}_{\rm rp} \approx a_1 f_{\rm ynp} + a_2 \phi + a_3 \dot{x} + a_4,$$
 (3)

где

$$a_1 \triangleq a_{x1} + l_{\max}a_{\phi 1}; \quad a_2 \triangleq a_{x2} + l_{\max}a_{\phi 2};$$
  
$$a_3 \triangleq a_{x3} + l_{\max}a_{\phi 3}; \quad a_4 \triangleq a_{x4} + l_{\max}a_{\phi 4}.$$

В силу исходной установки на прямое слежение за перемещением груза уравнение (3) далее будем считать объектом управления и использовать его как исходное при синтезе закона управления.

#### Закон управления

Поскольку динамика объекта управления соответствует колебательному процессу, то в качестве эталонной модели, задающей требуемые характеристики перемещения груза, примем неявную модель в виде колебательного звена со значениями переменных в начальный момент времени, равными соответствующим для исходного объекта:

$$\ddot{x}_{\rm M} = a_{\rm M1} \dot{x}_{\rm M} + a_{\rm M0} (x_{\rm M} - x_{\rm rp}^{\rm 3 a \mu}), \qquad (4)$$

где  $x_{\rm M}$  — переменная, описывающая эталонную динамику движения груза по оси *X*;  $x_{\rm rp}^{\rm 3ad}$  заданное значение  $x_{\rm rp}$ , или целевое место доставки груза; выбираемые параметры эталонной модели:  $a_{\rm M1} \triangleq -2\xi_{\rm M}\omega_{\rm M}$ ;  $a_{\rm M0} \triangleq -(\omega_{\rm M})^2$ ;  $\xi_{\rm M}$ ,  $\omega_{\rm M}$  — эталонные значения относительного коэффициента затухания и собственной частоты, соответственно [19].

Очевидно, что собственная частота эталонной модели не может быть больше такой же для объекта управления, иначе это противоречит физическим законам движения объекта управления и усложняет управление. В области целевой точки  $x_{rp}^{зад}$  объект управления близок к маятнику с неподвижным основанием, собственная частота которого равна  $\sqrt{g/l}$ . Поэтому примем

$$\omega_{\rm Mmin} \le \omega_{\rm M} \le \sqrt{g/l},\tag{5}$$

где  $\omega_{\rm m\,min}$  — ограничение  $\omega_{\rm m}$  снизу по условиям быстродействия системы управления. Уточнение этой зависимости будет приведено далее.

Отметим, что если правая часть уравнения (3) описывается в соответствии с назначенным эталоном (4), тогда, в силу принятых условий и соотношений (2), динамика объекта будет близка к эталонной модели:

$$\ddot{x}_{rp} \cong a_{M1}\dot{x}_{rp} + a_{M0}(x_{rp} - x_{rp}^{3a\mu}).$$
 (6)

Далее, подставляя в уравнение (3) вместо его левой части правую часть уравнения (6) и заменяя  $\dot{x}_{rp}$  на  $\dot{x}$  (этот момент будет рассмотрен далее), определяем идеальное управляющее воздействие  $f_{ynp}$ , построенное на точных значениях параметров объекта ( $a_1, a_2, a_3, a_4$ ):

$$f_{y\pi p} \approx a_1^{-1} [(a_{M1} - a_3)\dot{x} + a_{M0}(x_{rp} - x_{rp}^{3a\beta}) - a_2\phi - a_4].$$
(7)

Для поиска в текущем времени оценок указанных параметров будем использовать алгоритм идентификации (идентификатор) — рекуррентный метод наименьших квадратов с фактором забывания [20]:

$$\begin{cases} \hat{\Theta}_{i} = \hat{\Theta}_{i-1} + P_{i}y_{i}\varepsilon_{i}; \ \varepsilon_{i} \triangleq z_{i} - y_{i}^{\mathsf{T}}\hat{\Theta}_{i-1}; \\ P_{i} = [P_{i-1} - P_{i-1}y_{i}y_{i}^{\mathsf{T}}P_{i-1}(1 + y_{i}^{\mathsf{T}}P_{i-1}y_{i})^{-1}]/\beta; \ (8) \\ P_{0} = \vartheta E_{3}; \ \beta < 1; \beta \to 1, \end{cases}$$

где индекс i = 1, 2, 3, ... -указывает на дискретные моменты времени с шагом  $\Delta t$ ;  $\hat{\theta}_i \triangleq [\hat{a}_{2i}, \hat{a}_{3i}, \hat{a}_{4i}]^{T}$  — вектор искомых оценок; индекс "T" означает транспонирование;  $y_i \triangleq [\phi_i, \dot{x}_i, 1]^{T}$  — вектор регрессоров, соответствующий искомым оценкам;  $\varepsilon_i$  — невязка идентификации;  $z_i \triangleq \ddot{x}_{\text{гр}i} - \hat{a}_1 f_{\text{упр}i}$  — отклик объекта, где оценка  $\hat{a}_1$  определяется отдельно (показано ниже);  $P_i$  — матричный (3×3) коэффициент усиления алгоритма;  $\beta$  — назначаемый фактор забывания прошедших измерений для слежения за изменяющимися во времени искомыми параметрами;  $\vartheta$  — положительное число, задающее начальную скорость изменения оценок;  $E_3$  — единичная (3×3) матрица.

Предположим, что через малый промежуток времени работы системы невязка идентификации будет близка к нулю ( $\varepsilon \approx 0$ ), тогда в соответствии с системой (8) можно в непрерывном времени записать вместо соотношения (3):

$$\ddot{x}_{\rm rp} \approx \hat{a}_1 f_{\rm ynp} + \hat{a}_2 \phi + \hat{a}_3 \dot{x} + \hat{a}_4. \tag{9}$$

Это дает возможность строить закон управления, сформированный вместо (7) на текущих оценках параметров объекта управления:

$$f_{y\pi p} \approx \hat{a}_1^{-1} [(a_{M1} - \hat{a}_3) \dot{x} + + a_{M0} (x_{rp} - x_{rp}^{3a\mu}) - \hat{a}_2 \phi - \hat{a}_4].$$
(10)

На основании работы [21] этот закон управления в замкнутой системе управления обеспечит  $\varepsilon \xrightarrow{\approx} 0$ , а значит справедливость (9), если

$$\operatorname{sign}(\hat{a}_1) = \operatorname{sign}(a_1); \ |a_1|/2 \le |\hat{a}_1| \le |\hat{a}_1|_{\max}; \\ d\hat{a}_1/dt \to 0,$$
(11)

где  $|\hat{a}_1|_{\max} \ge 2|a_1|$  — верхнее ограничение оценки параметра  $a_1$ , которое определяется экспериментально по качеству результирующего управления.

Для выполнения последнего условия проанализируем параметр  $a_1$ . Из соотношений (2), (3) и условия  $J \triangleq \eta m_2$ , где  $\eta > 0$  — коэффициент [22], следует, что

$$m_1^{-1} \ge a_1 = (m_1 \chi + m_2)^{-1} > 0;$$
  
 $\chi \triangleq 1 + l^2 / h \ge 1.$  (12)

Замечание 1. Особенность выбора  $\omega_{\rm M}$ . Из опыта исследования адаптивной системы управления (3), (4), (8), (10) установлено (по крайней мере, для рассматриваемой ниже установки), что наилучшее качество адаптивного управления при наибольшем быстродействии обеспечивается в случае, если частоту эталонной модели (5) задавать как  $\omega_{\rm M} \approx (0, 4 \div 0, 6) \sqrt{g/l}$ . Если назначить

$$\omega_{\rm M} = 0, 5\sqrt{g/\hat{l}_{30\%}},$$
 (13)

где  $l_{30\%}$  — оценка длины подвеса груза с погрешностью не хуже  $\pm 30$  % от истины, то условие (13) будет удовлетворять указанному диапазону для  $\omega_{\rm M}$ . В силу такого слабого требования к точности оценки длины подвеса последнюю можно определять, например, по следующему простому соотношению:

$$l = l_0 + l'_{\rm cp}(t_{\rm спуска} - t_{\rm подъема}),$$

где  $\hat{l}_0$  — начальное значение оценки;  $l'_{\rm cp}$  — средняя скорость подъема/спуска груза (положительная величина, считается известной);  $t_{\rm подъема}$ ,  $t_{\rm спуска}$  — время подъема или спуска груза соответственно — измеряемые величины (считаем, что подъем и спуск происходит гораздо медленней остальных процессов).

Замечание 2. Замена сигнала  $\dot{x}_{\rm rp}$  на  $\dot{x}$  при выводе закона управления (7) и (10) обусловлена тем, чтобы структура системы с управлением (7) или (10) соответствовала структуре объекта управления (3), а также исходных для него зависимостей (2). В противном случае появляется внутренняя неустойчивость. Такая

замена не вносит большого рассогласования с введенным эталоном (4), поскольку сигнал  $\dot{x}_{rp}$  отличается от  $\dot{x}$  только угловой составляющей  $l_{max}\phi$ , поэтому эта замена дает отличие только на переходных процессах.

Для устранения внутренней неустойчивости многомерного исходного объекта (2) также нужно использовать достаточно большую оценку  $\hat{a}_1$ , что снижает размах управления (10). Это, в свою очередь, соответствует снижению общего коэффициента усиления в контуре замкнутой системы управления и повышению запаса устойчивости по амплитуде [19]. Поэтому на основании (11) с учетом (12) рассматриваемую оценку целесообразно представлять в виде

$$\left|\hat{a}_{1}\right| \equiv \left|\hat{a}_{1}\right|_{\max} = \text{const}$$
(14)

и исключать из алгоритма идентификации (8).

#### Результаты моделирования

Основные параметры объекта управления приняты в соответствии с разработанным макетом мостового крана [23]:  $m_1 = 2$  [кг];  $|f_{y п p}| \le$  $\leq$  10 [H];  $l = l_{max} = 1,5$  [м]. На макете для из-мерения переменных ф и  $\ddot{x}_{rp}$  используется датчик GY-521, построенный на микромеханическом чипе MPU-6000/MPU-6050, измеряющем угловые скорости и ускорения по трем осям [24], установленный на крюке подъемного механизма (около груза). Сигнал ф рассчитывается интегрированием измеренной производной  $\phi$ . Определение переменной *x* осуществляется по энкодеру, установленному на тележку, а  $\dot{x}$  — пропусканием сигнала x через реальное дифференцирующее звено с единичным коэффициентом усиления и постоянной времени 0,01 [c]. В соответствии с этим шумы измерения переменных  $\dot{\phi}$ ,  $\ddot{x}_{rp}$  и x считались гауссовскими центрированными, со среднеквадратичным отклонением соответственно: 0,05 [град/с]; 0,1 [м/с<sup>2</sup>]; 0,1 · 10<sup>-3</sup> [м].

Параметры эталона (4):  $\xi_{\rm M} = 0.9$ ; считаем, что  $\omega_{\rm M}$  удовлетворяет (13) при точной оценке *l*, поэтому  $\omega_{\rm M} = 1.28 \ [{\rm c}^{-1}]$ ;  $x_{\rm rp}^{3a\pi} = 1 \ [{\rm M}]$ . Параметры алгоритма идентификации (8):  $\Delta t = 0.01 \ [{\rm c}]$ ;  $\vartheta = 10$ ;  $\beta = 0.99$ . Закон управления (10) вычислялся дискретно с тем же временным шагом. Управление фильтруется на апериодическом звене с постоянной времени 0.05 [c], моделирующем привод. Также была сформирована задержка 0.01 [c] при подаче управления на объект. Смоделировано воздействие ветра на подвешенный груз, начинающееся в момент времени 7.5 [c] и имеющее ступенчатый вид с размахом, пропорциональным массе груза. Исследование проводили в среде МАТLAB.



Рис. 2. Переходный процесс системы управления при  $m_2 = 1$  кг, J = 0,008 кг·м<sup>2</sup> Fig. 2. The transition process of control system with  $m_2 = 1$  kg, J = 0,008 kg·m<sup>2</sup>



Рис. 3. Текущая идентификация в системе управления при  $m_2 = 1$  кг, J = 0,008 кг·м<sup>2</sup>

Fig. 3. Continuous identification in the control system at  $m_2 = 1$  kg, J = 0,008 kg·m<sup>2</sup>





На рис. 2—4 приведены результаты исследования системы управления при различных параметрах объекта.

В результате предварительных исследований системы управления и на основании соотношений (11), (12) и (14) экспериментально была определена величина  $\hat{a}_1 \equiv |\hat{a}_1|_{\text{max}} = 0,1 [\kappa \Gamma^{-1}]$  намного больше истинного значения (см. рис. 3), она мало зависит от изменения параметров объекта управления.

Рис. 2 соответствует следующим параметрам:  $m_2 = 1$  [кг], J = 0,008 [кг·м<sup>2</sup>], при этом рис. 3 отображает процесс текущей идентификации в этом исследовании. На рис. 4 представлены переходные процессы при параметрах груза:  $m_2 = 5$  [кг], J = 0,02 [кг·м<sup>2</sup>].

Хотя текущие оценки параметров далеки от истины, невязка идентификации близка к нулю, и траектория перемещения груза близка к эталонной, внешнее возмущение парируется. Подобным образом были проведены исследования разработанной системы управления макетом мостового крана в широком диапазоне типовых вариантов переносимого груза ( $l = l_{max} = 1,5$  [м]), указанных в таблице.



Рис. 5. Время регулирования линейного перемещения груза по вариантам груза Fig. 5. Time of regulation of linear movement of load

by variants

N⁰	Параметры объекта управления	Тип и размеры груза	№	Параметры объекта управления	Тип и размеры груза			
1	$m_2 = 0.01 \text{ [KG]}, J = 0.00004 \text{ [KG·m2]}$	Полнотелый шар	7	$m_2 = 2$ [кг]; $J = 0,018$ [кг · м <sup>2</sup> ]	Контейнер			
2	$m_2 = 0,1 \text{ [kg]}, J = 0,0004 \text{ [kg·m2]}$	с радиусом 0,1 [м]	8	$m_2 = 5 \text{ [kg]}; J = 0.045 \text{ [kg·m^2]}$	0,303 [M] × 0,122 [M] ×			
3	$m_2 = 1 \text{ [kg]}, J = 0,004 \text{ [kg·m^2]}$		9	$m_2 = 8 \text{ [kg]}; J = 0,0723 \text{ [kg·m^2]}$	0,129 [м]			
4	$m_2 = 4 \ [\text{kg}], \ J = 0.016 \ [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		10	$m_2 = 1$ [кг]; $J = 0,0076$ [кг·м <sup>2</sup> ]	Труба длиной 0,3 [м]			
5	$m_2 = 8 \ [\text{kg}], \ J = 0.032 \ [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		11	$m_2 = 4 \text{ [kg]}; \text{ J} = 0,0303 \text{ [kg·m^2]}$	и радиусами			
6	$m_2 = 0.01 \ [\text{kg}]; J = 0.00009 \ [\text{kg}\cdot\text{m}^2]$	Контейнер 0,303 [м] ×	12	$m_2 = 8 \text{ [kr]}; J = 0,0606 \text{ [kg·m2]}$	0,0125 [м], 0,0123 [м]			
		0,122 [м] × 0,129 [м]						

Варианты груза The options of load

Оценивалось время регулирования — интервал времени, за который груз достигает заданного положения с точностью не хуже  $\pm 5$  % от заданного. Зависимость этого времени от параметров груза по таблице представлена на рис. 5. Время регулирования не превышает 3,5 с. Этому же времени соответствует успокоение угловых колебаний груза до амплитуды 0,5°. Подобные результаты без смены параметров системы управления были получены и при других параметрах крана и возмущениях.

#### Заключение

Представленный метод управления мостовым краном и результаты исследования указывают на высокую эффективность построения системы управления по предложенному подходу. В конкретных условиях система требует минимальной предварительной настройки, связанной с выбором параметров алгоритма (8), возможного уточнения (13), определения оценки  $\hat{a}_1$  в соответствии с соотношениями (11), (12), (14) и, наконец, с выбором длины подвеса, соответствующей целевой точке доставки груза. При работе в условиях текущей неопределенности система управления быстро подстраивается под реальные характеристики объекта управления и внешних неконтролируемых возмущений, гасит колебания груза, обеспечивает высокую точность позиционирования груза в заданном положении. Систему управления можно построить на доступном недорогом оборудовании. Предлагаемый метод может являться основой для создания реальных систем управления кранам любых типов, работающих с подвешенным грузом.

#### Список литературы

1. Антипов А. С., Краснова С. А. Система стабилизации положения тележки крана с использованием сигмоидальной функции // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20, № 10. С. 609—614.

2. Толочко О. И., Бажутин Д. В. Гашение колебаний перемещаемых мостовыми кранами грузов при переменной длине каната // Завалишинские чтения. Санкт-Петербург. 2016. С. 250—255.

3. Щербаков В. С., Корытов М. С., Шершнева Е. О. Активный способ гашения колебаний груза после остановки мостового крана // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 6. С. 368—374.

4. Le Tuan Anh, Gook-Hwan Kim, Min Young Kim, SoonGeul Lee. Partial Feedback Linearization Control of Overhead Cranes with Varying Cable Lengths // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2012. Vol. 13, N. 4. P. 501–507.

5. Черноусько Ф. Л., Ананьевский И. М., Решмин С. А. Методы управления нелинейными механическими системами. М.: Физматлит, 2006. 328 с.

6. Мещеряков В. Н., Колмыков В. В. Способы определение параметров грузов, перемещаемых мостовыми кранами

с системой автоматического успокоения колебаний // Фундаментальные исследования. 2015. № 7. С. 79—84.

7. Инструкция по эксплуатации DRIVEPAC Anti-Sway Control for Cranes for T400 Technology Module in SIMOVERT MASTER DRIVES 6SE70/71 and SIMOREG DC-MASTER 6RA70. Siemens AG. 2002. 363 с.

8. Петренко Ю. Н., Алави С. Э., Александровский С. В. Исследование работы крана с контроллером нечеткой логики на основе трехмерной имитационной модели // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2011. № 3. С. 20–25.

9. Ухоботов В. И., Величко В. С. Стабилизация математического маятника с основанием на колесе с помощью нечеткого алгоритма управления // Вестник ЮУрГУ. 2014. Т. 14, № 2. С. 18—23.

10. **Orbisaglia M., Orlando G., Longhi S.** A comparative analysis of sliding mode controllers for overhead cranes // 16th Mediterranean Conference on Control and Automation Congress Centre. Ajaccio. France. 2008. P. 670–675.

11. Ngo Q. H., Nguyen N. P., Nguyen C. N., Tran T. H., Hong K. S. Fuzzy sliding mode control of container cranes // International Journal of Control, Automation and Systems. 2015. Vol. 13, N. 2. P. 419–425.

12. Chen Z. M., Meng W. J., Zhang J. G. Intelligent antiswing control for bridge crane // Journal of Central South University. 2012. Vol. 19, N. 10. P. 2774–2781.

13. **Ma B., Fang Y., Zhang X.** Adaptive tracking control for an overhead crane system // Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea. 2008. P. 12194–12199.

14. Fang Y., Ma B., Wang P., Zhang X. A Motion planningbased adaptive control method for an underactuated crane system // IEEE Transactions on control systems technology. 2012. Vol. 20, N. 1. P. 241–248.

15. N. Sun, Y. Fang, H. Chen. Adaptive antiswing control for cranes in the presence of rail length constraints and uncertainties // Nonlinear Dyn. 81. 2015. P. 41–51.

16. **Boustany F., d'Andrea-Novel B.** Adaptive Control of an Overhead Crane using Dynamic Feedback Linearization and Estimation Design. Centre Automatique et Systemes, Ecole des Mines de Paris. 1992. P. 1963–1968.

17. **Круглов С. П., Ковыршин С. В., Ведерников И. Е.** Адаптивное управление перемещением груза мостовым краном с идентификационным алгоритмом // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 4. С. 114—122.

18. **Круглов С. П.** Условия адаптируемости систем управления с идентификатором и эталоном. Монография: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbucken, Deutschland. 2012. 125 с.

19. Первозванский А. А. Курс теории автоматического управления. Учеб. пособие для вузов. Лань, Санкт-Петербург, 2015. 624 с.

20. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: Пер. с англ. / Под ред. Я. З. Цыпкина. М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит. 1991. 432 с.

21. Круглов С. П. Сходимость невязки идентификации в системе управления с параметрической адаптацией // "Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами": электрон. науч. журн. 2019. № 1. С. 27—40. URL: http://ismm-irgups.ru/ toma/12-2019, свободный (дата обращения: 18.02.2020).

22. Сивухин Д. В. Общий курс физики. М.: Наука, Механика. 1979. Т. 1. 520 с.

23. Аксаментов Д. Н., Круглов С. П., Ковыршин С. В. Установка по исследованию алгоритмов успокоения колебаний груза мостового крана // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2019. Т. 2. С. 288—292.

24. MPU-6000/MPU-6050 Product Specification. InvenSense, 2013. 54 p. URL: http://www.invensense.com.

### A Method of Adaptive Control of an Overhead Crane with Direct Tracking of the Load Movement

S. P. Kruglov, kruglov s p@mail.ru, D. N. Aksamentov, Gaastra104@mail.ru, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, 664074, Russian Federation

> Corresponding author: Kruglov S. P., Professor, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, 664074, Russian Federation, e-mail: kruglov s p@mail.ru

> > Accepted on August 14, 2020

The paper proposes a method of automated control of an overhead crane aimed at direct tracking of horizontal movement of the load at a set height to the designated position under the conditions of continuous a priori uncertainty of the load parameters and external disturbances. The latter include wind effects, friction changes in the crane trolley movement, etc. The approach replaces two conventional problems: tracking of the crane trolley movement to a set position and damping of angular oscillations of the load. In addition, the proposed control method is based on an adaptive control approach with an identifier and an implicit reference model using "simplified" adaptation conditions. The latter are reduced to the requirement of convergence of the identification residual at applying an algorithm for continuous identification and the selection in a certain range of constant evaluation of the control coefficient. The said evaluation is chosen sufficiently large in its absolute value to provide the largest margin of stability of the closed control system in amplitude with the required quality of control. In order to implement continuous parametric identification, it is proposed to apply recursive least squares method with a forgetting factor. The reference model is chosen in the form of an oscil-latory link with an eigenfrequency not exceeding that of a controlled object with a fixed base and falling within an experimentally set range. For closer definition of the reference eigenfrequency, an evaluation of the load suspension length with an accuracy of at least 30% is required. The simplest algorithm for obtaining such an estimate is proposed. It is based on the average velocity of the vertical movement of the load, which is generally approximately known. The paper proposes a simple algorithm for obtaining such an evaluation and provides the results of model studies of the efficiency of the proposed adaptive control system on the basis of the performance of the developed experimental overhead crane unit, taking into account the characteristics of standard data sensors and drives. The proposed method has demonstrated its high efficiency in a wide range of loads and disturbance conditions. It can serve as a basis for development of functional control systems for any type of cranes for moving suspended loads.

Keywords: overhead crane, oscillations damping, current identification algorithm, adaptive control system, control law, reference model

For citation

Kruglov S. P., Aksamentov D. N. A Method of Adaptive Control of an Overhead Crane with Direct Tracking of the Load Movement, Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, 2020, vol. 21, no. 12, pp. 682-688.

DOI 10.17587/mau.21.682-688

Abstract

#### References

1. Antipov A. S., Krasnova S. A. System for stabilizing the position of the crane truck using the sigmoid function, *Mekhatronika*, *Automatizatsiya*, *Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 10, pp. 609–614 (in Russian)

(In Russian).
 2. Tolochko O. I., Bazhutin D. V. Eliminating the payload swing for overhead cranes under the variation of cable length, Zaval-ishensky reading. Saint-Petersburg, 2016, pp. 250–255 (in Russian).
 3. Shherbakov V. S., Korytov M. S., Shershneva E. O. Active method for dampening load fluctuations after stopping the bridge crane, Mekhatronika, Automatizatsiya, Upravlenie, 2016, vol. 17, pp. 269–274 (in Bussian).

 4. Le Tuan Anh, Gook-Hwan Kim, Min Young Kim, SoonGeul
 Lee. Partial Feedback Linearization Control of Overhead Cranes with Varying Cable Lengths, *International Journal of Precision En-*gineering and Manufacturing, 2012, vol. 13, no. 4, pp. 501–507. 5. Chernous'ko F. L., Anan'evskij I. M., Reshmin S. A. Con-

trol methods of nonlinear mechanical systems. Moscow, Fizmatlit,

troi metnods of nonlinear mechanical systems. Moscow, Fizmatlit, 2006, 328 p. (in Russian).
6. Meshherjakov V. N., Kolmykov V. V. Methods for determining the parameters of loads moved by bridge cranes with automatic vibration calming system, *Fundamental study*, 2015, no. 7, pp. 79–84 (in Russian).

7. **Operating** instructions. DRIVEPAC Anti-Sway Control for Cranes for T400 Technology Module in SIMOVERT MASTER DRIVES 6SE70/71 and SIMOREG DC-MASTER 6RA70. Sie-

DRIVES 6SE70/71 and SIMOREG DC-MASTER 6RA70. Siemens AG, 2002, 363 p.
8. Petrenko Yu. N., Alavi S. E., Aleksandrovskij S. V. Investigation of crane operation with odd logic controller based on 3D simulation model, *Energy, Proceedings of higher educational institutions and energy associations of the CIS*, 2011, no. 3, pp. 20–25 (in Russian).
9. Uxobotov V. I., Velichko V. S. Stabilisation of the mathematical pendulum with the base on the wheel using an odd control algorithm, *Vestnik YuUrGU*, 2014, 14 (2), pp. 18–23 (in Russian).
10. Orbisaglia M., Orlando G., Longhi S. A comparative analysis of sliding mode controllers for overhead cranes, *16th Mediterranean Conference on Control and Automation Congress Centre, Ajaccio. France*, 2008, pp. 670–675.
11. Ngo Q. H., Nguyen N. P., Nguyen C. N., Tran T. H., Hong K. S. Fuzzy sliding mode control of container cranes, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2015, vol. 13, no. 2, pp. 419–425.

12. Chen Z. M., Meng W. J., Zhang J. G. Intelligent anti-

Strang J. C. Chen Z. M., Weng W. J., Zhang J. G. Interligent anti-swing control for bridge crane, *Journal of Central South University*, 2012, vol. 19, no. 10, pp. 2774–2781.
13. Ma B., Fang Y., Zhang X. Adaptive tracking control for an overhead crane system, *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul*, Korea, 2008, 19, 1001–1010. pp. 12194-12199

14. Fang Y., Ma B., Wang P., Zhang X. A Motion planning-based adaptive control method for an underactuated crane system, *IEEE Transactions on control systems technology*, 2012, vol. 20, no. 1,

pp. 241–248.
15. Sun N., Fang Y., Chen H. Adaptive antiswing control for cranes in the presence of rail length constraints and uncertainties,

Nonlinear Dyn., 2015, vol. 81, pp. 41–51.
 16. Boustany F., d'Andrea-Novel B. Adaptive Control of an Overhead Crane using Dynamic Feedback Linearization and Es-

Boustany F., d'Andrea-Novel B. Adaptive Control of an Overhead Crane using Dynamic Feedback Linearization and Es-timation Design, Centre Automatique et Systemes, Ecole des Mines de Paris, 1992, pp. 1963–1968.
 Kruglov S. P., Kovy'rshin S. V., Vedernikov I. E. The adaptive control of movement of cargo by the overhead crane with an identification algorithm, Modern technology, System analysis, Modeling, 2017, no. 4, pp. 114–122 (in Russian).
 Kruglov S. P. The terms of the adaptability of control systems with an identifier and a benchmark, Monograph, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbucken. Deutschland, 2012, 125 p.
 Pervozvanskij A. A. Automatic control theory course, textbook for universities, Saint-Petersburg, Lan', 2015, 624 p. (in Russian).
 Ljung L. System Identification: Theory for the User, Uni-versity of Linkoping, Sweden, 1991, 432 p.
 Kruglov S. P. Convergence of the residual identification error in the control system with parametrical adaptation, Informa-tion technology and mathematical modeling in the management of complex systems, electronic scientific journal, 2019, no. 1, pp. 27–40 (in Russian), available at: http://ismm-irgups.ru/toma/12-2019.
 Sivuxin D. V. General course of physics, Moscow, Science, Mechanics, 1979, vol. 1, 520 p. (in Russian).
 Aksamentov D. N., Kruglov S. P., Kovy'rshin S. V. Instal-lation for investigation of bridge crane load vibration calming algo-rithms, Transport infrastructure of the Siberian region, 2019, no. 2, pp. 288–292 (in Russian)

rithms, *Transport infrastructure of the Siberian region*, 2019, no. 2, pp. 288–292 (in Russian). 24. MPU-6000/MPU-6050 Product Specification. InvenSense, 2013, 54 p., available at: http://www.invensense.com.

## РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

#### УДК 621.865.8

#### DOI: 10.17587/mau.21.689-695

**O. V. Darintsev<sup>1, 2</sup>,** D. Sc., ovd.uimech@gmail.com, **A. B. Migranov<sup>2</sup>**, Cand. Sc., abm.imech.anrb@mail.ru, <sup>1</sup> USATU, Ufa, 450077, Russian Federation,

<sup>2</sup> Mavlyutov Institute of Mechanics, Ufa Investigation Center, R. A.S., Ufa, 450054, Russian Federation

*Corresponding author:* **Darintsev Oleg V.,** D. Sc., Ufa State Aviation Technical University, Mavlyutov Institute of Mechanics, Ufa, Russian Federation, e-mail: ovd.uimech@gmail.com

Accepted on August 17, 2020

## A Step-by-Step Algorithm for Finding the Optimal Strategy for the Behavior of a Group of Robots

#### Abstract

The solution of the multi-criteria problem, which includes the distribution of objectives, the planning of trajectories and the optimization of energy consumption, is considered in the realization of the collective interaction of robots. It is proposed to use a genetic algorithm according to the chosen conditions (constraints) and optimality criteria to find the best strategy for group behavior. The considerable difficulty in choosing how to control a team of autonomous mobile robots represents the distribution of tasks among agents that operate under conditions of parametric and information uncertainty, possess "modest" hardware, power and functionality. Therefore, the implementation of a multi-stage search for an optimal solution requires a specialized approach that takes into account the whole range of dynamic parameters, allowing for real-time target correction and degradation of robots until they fail. The basis of the proposed neurogenetic algorithm is a new algorithm for calculating the fitness function, in which the results of the neural network method of trajectory planning for a group of robots are used, as well as information about the initial charge of the batteries of robotic agents of the collective, the energy consumption of each agent and the preliminary estimation of the algorithm and given the high dynamism of the external environment, it was decided to limit the search for solutions to only one step (the next working beat of the collective). The paper presents the results of the simulation of the task of finding the optimal behavior of robots, the algorithm of calculation of the specialized fitness function and the optimos of step-by-step search of the global strategy of distribution of tasks, which make it possible to increase the efficiency of the use of the team of robots due to the guaranteed production of tasks, so well as to increase the working time of the team due to the correct energy consumption.

Keywords: strategy of group behavior, robot collective, neurogenetic algorithm, fitness function, problem distribution

**Acknowledgments:** This work was supported within the framework of state assignment No. 0246-2018-007. For citation:

Darintsev O. V., Migranov A. B. A Step-by-Step Algorithm for Finding the Optimal Strategy for the Behavior of a Group of Robots, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 12, pp. 689–695.

DOI: 10.17587/mau.21.689-695

УДК 621.865.8

DOI: 10.17587/mau.21.689-695

О. В. Даринцев<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук, ovd.imech@gmail.com, А. Б. Мигранов<sup>2</sup>, канд. техн. наук, abm.imech.anrb@mail.ru, <sup>1</sup> УГАТУ, Уфа, Россия, <sup>2</sup> Институт механики им. Р. Р. Мавлютова, Уфа, Россия

# Алгоритм пошагового поиска оптимальной стратегии группового поведения роботов<sup>1</sup>

Рассматривается решение многокритериальной задачи, включающее распределение целей, планирование траекторий и оптимизацию расхода энергии, при реализации коллективного взаимодействия роботов. Для поиска оптимальной стратегии группового поведения предлагается использовать генетический алгоритм в соответствии с выбранными условиями (ограничениями) и критериями оптимальности.

<sup>1</sup>Работа поддержана в рамках госзадания №0246-2018-007.э

Существенную сложность при выборе способов управления группой автономных мобильных роботов представляет распределение задач между агентами, которые действуют в условиях параметрической и информационной неопределенностей, обладают "скромными" аппаратными, энергетическими и функциональными возможностями. Поэтому реализация многопараметрического поиска оптимального решения требует специализированного подхода, учитывающего весь комплекс динамических параметров, допускающего коррекцию целей в реальном масштабе времени и деградацию роботов вплоть до их выхода из строя.

Основой предлагаемого нейрогенетического алгоритма является новый алгоритм расчета фитнесс-функции, в котором используются результаты нейросетевого метода планирования траекторий для группы роботов, а также информация о начальном заряде батарей роботов — агентов коллектива, энергопотреблении каждого агента и предварительная оценка энергозатрат, необходимых агенту на выполнение доступных ему отдельных заданий. Для обеспечения приемлемой производительности алгоритма и с учетом высокого динамизма внешнего окружения было принято решение ограничиться поиском решений только на один шаг (следующий рабочий такт коллектива). В работе приводятся результаты моделирования задачи поиска оптимальной стратегии поведения роботов, алгоритм расчета специализированной фитнесс-функции и варианты пошагового поиска глобальной стратегии распределения заданий, которые позволяют повысить эффективность использования коллектива роботов за счет гарантированного получения результат при минимизации суммарного времени выполнения всех поставленных заданий, а также увеличить время работы коллектива за счет корректного расхода энергии.

**Ключевые слова:** стратегия группового поведения, коллектив роботов, нейрогенетический алгоритм, фитнессфункция, распределение задач

#### Introduction

The current target areas for mobile robotic systems are modern production lines, environmental monitoring, handling and storage, inspection and investigation of hard-to-reach/hazardous environments, threatening human life, etc.

The most effective use of mobile robots in these domains is when they are used collectively when they come together to solve a single target. However, the following issues of group management related to the organization of the collective interaction of robots arise:

1) Distribution goals and tasks to robots, taking into account the nature of the objectives, functionality and environment of each robot;

2) The planning of the trajectories and the allocation of subspaces for each robot, taking into account possible conflicts in operation;

3) Optimization of energy consumption of individual robots when moving through working space and performing functional tasks in order to increase the efficiency of work of the whole team.

Therefore, the problem of group control of mobile robots with the definition of a multi-criteria problem, which includes the distribution of objectives, planning and optimization of energy consumption, is topical. Analysis of current research has shown that insufficient attention has been paid to group control of robots with integrated performance optimization at both the strategic, tactical and energy levels. Quite often, research offers its own method of solving only a private problem, which is usually either not applicable or requires considerable refinement in solving a complex problem. Consider in more detail some of the methods of solving private problems encountered in group control of mobile robots.

Among the many publications on task distribution are: centralized distribution algorithms [1, 2], multi-agent RTS control algorithms under uncertainty, using neural networks [3], fuzzy logic [4] and dynamic programming algorithms [5], augmented and virtual reality technology [6], potential fields [7], cognitive adaptive method [8]. In some cases, heterogeneous groups of robots act as distribution algorithms target and treat the problem as a complex combinatorial problem [9, 10]. In addition, methods of relaxation of Lagrange [11] and ant algorithms [12] are often used. It should be noted that a large part of the algorithms presented in the above-mentioned publications are designed to solve target allocation problems in a particular case where the number of robots in the working space corresponds to the number of objectives.

The problem of planning optimal routes for mobile robots, which is closely related to operational planning, has been addressed in numerous studies, but as a separate application. Currently known solutions can be divided into two main classes precision and approximation [13]. Among the latter are various ways of implementing intelligent planning algorithms constructed using neural networks, fuzzy or genetic algorithms (GA) [14]. Intelligent methods show the best results in solving planning problems that are difficult to implement on-board computing systems of mobile robots using classical breakthrough or potential algorithms.

Optimization of energy consumption in the collective use of robots and trajectories/movements of individual robots has been repeatedly raised by researchers [15—20]. Most often, energy efficiency improvements were achieved through hardware modifications: the use of adjustable speed drives and special software with the emulation of a mobile robot in a virtual model based on analytical data and working

in real time [15] or the application of parallel elastic elements to reduce energy consumption in a twolegged walking robot Sandia [16].

Interesting approach in work [17] where the algorithm of optimization of energy consumption in the swarm of feeding robots is presented, which implements rules of adaptation of robots based on information about environment and quality of communication. Reduction of electrical consumption and minimization of energy consumption are achieved in a group of robots by using a computer cluster, on which the software code is realized for rapid calculation of movement of robots in a group, simulation of movements in a labyrinth [18, 19]. Variants of evolutionary algorithms for optimizing the energy consumption of a group of robots during their movement and information exchange are also known [20].

According to the results of the survey, at present, there is no uniform method for the group control of the mobile robot team to solve the problems of target distribution, route planning and energy optimization as a single complex task. As the number of robots and the complexity of the task assigned to the team increase exponentially, the time to make decisions grows. Therefore, it is important to develop non-resource-based planning and control algorithms that take into account the specific capabilities of mobile robot on-board computing systems.

This work proposes a strategy for control a heterogeneous group of mobile robots with optimal performance parameters at strategic, tactical and energy levels.

## Setting the goal of optimizing a group behavior of robots

A working field of size  $N \times M$ , containing n robots and m tasks, coordinates of robots  $(x_i, y_i, i \in [1, n])$ , location coordinates of tasks  $(x_j, y_j, j \in [1, m])$  is considered. The goal of the team of robots is to perform tasks located in the field. Some field cells have an identifier for the incoming tasks ( $V_j$  vector). Robots have a class identifier  $(F_i)$ , with only one robot and/or one task in a single field cell.

Robots are divided into classes that uniquely define the group of tasks it can perform, the energy consumption of the robot in different modes, and the speed of movement. There are three modes/ states of the robot: sleep (waiting for the task), movement, and implementation of the task, each with its own energy consumption (for the *i*-robot —  $W_i^{SL}$ ,  $W_i^{MV}$ ,  $W_i^{WR}$  respectively). Each robot has an initial charge ( $P_i^R$ ).

Tasks are divided into several classes. Each class has its own energy consumption  $(W_i^{WR})$  — the en-

ergy that the robot must use to complete a given class of task. A robot can perform the same or a lower class task, but only if it has enough energy to execute it.

Given the above characteristics and constraints, it is necessary to synthesize an algorithm to find the optimal distribution of tasks among available robots, while minimizing the energy and time spent.

The optimality criteria used are: 1) total energy consumption:  $\phi_1(\overline{z}) = W_{\Sigma}(\overline{z}) \rightarrow \min_{\overline{z} \in \mathbf{Z}}$ ; 2) implementation time of all tasks:  $\phi_2(\overline{z}) = t_{\max}(\overline{z}) \rightarrow \min_{\overline{z} \in \mathbf{Z}}$ ; 3) a number tasks in a queue:  $\phi_3(\overline{z}) = N_{out}(\overline{z}) \rightarrow \min_{\overline{z} \in \mathbf{Z}}$ .

Here  $\overline{z}$  is a vector of problem numbers, each element of which  $z_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  defines the problem for the *i*-robot in the next step. The domain of valid  $\overline{z}$  vector values forms a set **Z**.

The three-criteria problem is to choose the optimal distribution of tasks among available robots: to find the values of variable parameters  $\overline{z}$ , which within the limit fulfill all the above conditions 1)—3). The vector optimality criterion  $\mathbf{J}(\phi_1(\overline{z}), \phi_2(\overline{z}), \phi_3(\overline{z}))$  is defined on the set  $\mathbf{Z}$ , and the value of each of the private optimality criteria must be minimized  $\phi_i(\overline{z})$ ,  $i = \overline{1, n}$ :

$$J: \min_{\overline{z}\in Z}(\phi_1(\overline{z}), \phi_2(\overline{z}), \phi_3(\overline{z})).$$

To find a solution, it is proposed to use GA according to the listed conditions (limitations) and optimum criteria. At the same time, the synthesis of GA and the coding of the decision are carried out according to the method presented in other authors' papers, where the applicability of GA for solving such a class of problems is proved [21] and the best results according to two criteria are obtained [22] but the motion trajectory module worked autonomously.

The main changes have been made in the algorithm for forming a fitness function for GA with parallel operation of the neural network system of trajectory planning, which makes it possible to obtain optimal routes for each of the evaluated workplans, So the synthesized algorithm can be considered a class of hybrid, neurogenetic.

The search for the optimal strategy is carried out for the multi-criteria task on one step in time (discrete), taking into account the energy consumption, the trajectory of the robots' motion and the time to complete the tasks. The optimal distribution of tasks is determined by the initial charge of the battery, the energy consumption of each robot and the energy spent on individual tasks. To plan trajecto-



Fig. 1. Basic fitness function algorithm

ries of motion, a neural network algorithm is used to find the optimal set of paths of the whole group of robots from starting points to target coordinates (problems) [23]. The GA is used as the basic approach for solving the multi-criteria problem. Each mode of operation and class of operation (problem) is characterised by their level of energy consumption, so the use of GA makes it possible to solve a multi-criteria optimization problem taking into account the integral criterion of efficiency, taking into account also the hardware realizable possibility of energy redistribution between robots. The classical search for such solutions relates to the multi-criteria optimization problem, so the main purpose of the synthesized algorithm is to find a minimum on a set of allowable combinations of the distribution and the use of the GA with the chosen conditions and optimality criteria will allow for an acceptable time for on-board computing systems to obtain a problem distribution close to optimal in parallel with the search for energy-efficient trajectories.

The following algorithm has been synthesized to calculate the fitness function:

1. Chromosome decoding. Genes are decrypted into problem numbers for each robot.

2. Compute the trajectory of robots to chromosomeencoded targets using a neural network algorithm. 3. Calculates the parameter  $W_{\Sigma}$  for the estimated task combination.

4. Calculate the time taken by robots to complete assigned tasks. Select the maximum time.

5. Calculates the parameter  $N_{\text{out}}$  for the estimated problem combination as the difference between the number of all tasks *m* and the number of non-zero elements in the vector  $\overline{z}$ .

6. Output of the derived fitness function vector for the individual in question  $\overline{z}$ .

The algorithm of the developed fitness function, taking into account the characteristics of the type of GA used, as well as the problem itself in the form of a flowchart, is shown in Fig. 1.

#### Finding the best one-step strategy for robots

In order to prove the functionality and efficiency of the neurogenetic algorithm, computer simulations are conducted on the generated set of variants of the distribution of robots and problems in the working field. Two variants of the simulated situations are shown below, the same for the baseline is only the size of operating field 10x10.

**Example 1.** One step strategy. There is a group of three robots that needs to do six tasks. The robots

are located in the cells of the working field with coordinates:  $\{6,2\}$  a robot of Class 3,  $\{4,10\}$  — Class 1 and  $\{1,7\}$  — Class 2; the energy reserve is equal to 40 units. The tasks are located on the working field with coordinates 1, 2 and 6 —  $\{8,3\}$ ,  $\{1,6\}$  and  $\{2,7\}$ , the task 2 of Class 3 —  $\{5,4\}$ , the tasks 3 of Class 4 and 5 —  $\{4,9\}$  and  $\{2,10\}$ . The energy consumption of the robots is given in table 1. The time required to complete the tasks is: for the robot of class 1,  $\{3,-,-\}$ ; for the robot of class 2,  $\{5,4,-\}$ ; for the robot of class 3,  $\{5,7,2\}$ .

The location of the robots and tasks in the working field is shown in Fig. 2.

The results of the one-step task distribution simulation are presented in table 2.

The minimum number of outstanding tasks is three, which is determined by the difference between the number of robots and the number of tasks (6-3).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1										
2						$P_1^{(3)}$				
3								$T_1^{(1)}$		
4					$T_{3}^{(2)}$					
5										
6	$T_2^{(1)}$									
7	$P_{3}^{(2)}$	$T_{6}^{(1)}$								
8										
9				$T_4^{(3)}$						
10		$T_{5}^{(3)}$		$P_{2}^{(1)}$						

Fig. 2. Location of robots and tasks in the workfield

Robot energy consumption								
Robot class	W <sup>SL</sup> , en. unit	<i>k<sup>MV</sup></i> , unit/unit of length	$M_{\nu}$ , unit of length/unit of time	Task class	W <sup>WR</sup> , en. unit			
1	2,1	0,7	100	1	3,2			
2	1,1	1,2	200	2	2,8			
3	1,7	0,9	150	3	5,8			

**Decisions received** 

Debet energy concumption

Table 2

Table 1

Decison.	Robot, №			$W_{\Sigma}$ ,	t <sub>max</sub> ,	N <sub>out</sub>
N⁰	1 2 3		en. unit	unit of time		
1	0	0	0	0	0	6
2	0	0	2	3,68	2,0	5
3	3	0	2	8,16	12,4	4
4	1	0	2	8,36	10,9	4
5	3	6	2	12,74	19,8	3



Fig. 3. The path travelled by robots for solution 5 (example 1)



Fig. 4. Movement dynamics of robots for solution 5 (example 1)

Fig. 3 and Fig. 4 show the trajectories of the robots and the velocity (dynamics) of movement on the working field for the fifth solution — the solution with the maximum number of completed tasks.

#### Step-by-step search for a global assignment strategy

Since the initial task is to find a distribution strategy for all tasks, we use the resulting algorithm to find a common strategy for the behavior of the robots in achieving the goal. We will find the optimal solution for assigning tasks to each of the next steps until all the tasks have been completed to do this. Step refers to the time from the starting point to the end of the task to be solved.

According to the original assignment, the task is removed after its completion, which leads to a change in the structure of the task: one of the tasks is eliminated, and the robot performing it is ready to proceed to the next. Therefore, after the task has been completed by the robot, it is necessary to restart the optimal strategy algorithm for the next step. Due to the discreteness of the field and the specificity of the task, the following points should be taken into account when switching to the following iteration of optimization:

1) a robot which, at the time of restart, is located at an intermediate point (moves between the grid nodes) is considered to be in the nearest traversed node;

2) the implemented task is considered complete (removed from the list of tasks) and transparent (not an obstacle) to robots;

3) one of the best three-criteria solutions must be chosen.

To select optimal solutions from the group, either an integral criterion is used or a command is expected from the decision maker. In order to automate the

calculations, the choice of the final decision will be made on the basis of the following criteria:

 select a solution with a minimum execution time among the decisions with a minimum number of unresolved tasks;

- if two solutions meet this condition, the one that uses less energy is selected.

This rule may vary depending on the global tasks.

We note that the algorithm is repeated with the original population obtained by the decision in the previous step.

The proposed algorithm also takes into account the situation where a robot can be removed from a task. That is, if a robot has started a task, and the results of calculating the next step show that it is more efficient to redirect it to another task, it stops doing the task. At the same time, the time required to complete a task is reduced by the time that the robot has already spent on it.

**Example 2.** The complete problem is solved, i.e. the robots have to complete all the tasks on the working field and there are static obstacles (black areas in Fig. 5).

The solution in the form of trajectories and displacement dynamics is presented in Fig. 6 and Fig. 7. The total time of the task was 62.1 units of time and the robots spend part of



Fig. 5. Location of robots, tasks and obstacles in the field of work for example 2  $\,$ 



Fig. 6. Trajectories of robots for example 2



Fig. 7. Dynamics of robots for example 2

their time doing roadblocks. We note that despite the obstacles, the algorithm allows the robots to be reallocated according to the respective tasks with the required efficiency.

This is a consequence of the introduction of the following specific actions into the algorithm for finding the optimal strategy:

1. In the next step robot coordinates shall be rounded to the nearest cell (to be achieved by reducing the grid size);

2. The solution obtained for each of the steps modifies the task list (the list contains only the remaining tasks) for the robots.

A further modification of the proposed approach consists in improving the strategy algorithm by 2-5 steps forward for each time frame, which will allow for a deeper analysis of the initial and intermediate states and a more efficient solution to the problem as a whole but it would require a lot of computing resources.

#### Conclusion

The work synthesizes the algorithm of step-bystep search of optimal behavior of the group of robots. The proposed algorithm is based on: a threeparameter adaptability function, the GA, a neural network algorithm for finding disjoint pathways for a group of robots and an algorithm for step-by-step solving of a common problem.

Using the developed algorithm, different source data generated strategies for a group of robots that minimized the sum of task time. Similarly, solutions can be obtained by minimizing the total energy consumption of a group of robots or maximizing the number of tasks completed in a limited time.

As part of further work, it is planned to implement the algorithm of finding the optimal strategy with several steps missing.

#### References

1. James Dwight McLurkin. Analysis and Implementation of Distributed Algorithms for Multi-Robot Systems: Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2008, 166 p.

2. **Zhu Hua.** Control of the movement of a group of mobile robots in a system of the type "convoy": Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, Zhu Hua, Moscow, 2018, 108 p. (in Russian).

3. **Glasius R., Komoda A., Gielen S.** Neural Network Dynamics for Path Planning and Obstacle Avoidance, *Neural Networks*, 1995, no. 8 (1), pp. 125–133.

4. **Ziemke T.** Adaptive behavior in autonomous agents, *Presence*, 2003, no. 7(6), pp. 564–587.

5. **Kruglikov S. V., Kruglikov A. S.** An a priori planning of joint motions for USV as a problem of guaranteed control/esti-

mation, *Applied Mechanics and Materials. TransTech Publications*, Switzerland, 2014, vol. 494–495, pp. 1110–1113.

6. **Darintsev O. V.** The use of advanced and virtual reality technologies in the implementation of algorithms for managing a team of robots, *Piece Intelligence*, 2013, no. 3, pp. 479–487.

7. **Renzaglia A. A., Martinelli A.** Potential field based approach for coordinate exploration with a multi-robot team, *8th IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics* (SSRR), doi: 10.1109/SSRR.2010.5981557.

8. Renzaglia A. Cognitive-based adaptive control for cooperative multi-robot coverage, *IEEE International Conference on Robotics and Intelligent System (IROS)*, 2010, doi: 10.1109/ IROS.2010.5649249.

9. **Darintsev O. V., Migranov A. B.** Distributed control system of mobile robots groups, *Vestnik USATU*, 2017, vol. 21, no. 2 (76), pp. 88–94 (in Russian).

10. Gary M., Johnson D. Computers and inaccessible tasks, Moscow, Mir, 1982, 416 p. (in Russian).

11. Ni M., Yu Z., Ma F., Wu X. A Lagrange Relaxation Method for Solving Weapon-Target Assignment Problem, *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering*, 2011, vol. 1, pp. 1–10.

12. Liu B., Qin Z., Wang R., Gao Y-B., Shao L-P. A Hybrid Heuristic Ant Colony System for Coordinated Multi-Target Assignment, *Information Technology Journal*, 2009, vol. 8, no. 2, pp. 156–164.

13. **Darintsev O. V., Migranov A. B.** Applications of approximate and intelligent trajectory planning methods for groups of mobile robots, *Scientific Review. Technical science*, 2015, no. 1, pp. 150–151, available at: https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=973 (date of access: 13/08/2020) (in Russian).

14. **Darintsev O. V., Migranov A. B.** Comparative analysis of intelligent planning methods, *Proceedings of the R. R. Mavlyutov Institute of mechanics of the Ufa scientific center of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 9, no. 2, pp. 53–58 (in Russian).

15. Wilkins J. 3 technologies for energy efficient robots, *EU Automation*. 24 august 2017, available at: https://www.automation. com/automation-news/article/3-technologies-for-energy-efficient-robots (access date: 03/05/2019).

16. **Mazumdar A.** Parallel elastic elements improve energy efficiency on the STEPPR Bipedal walking robot, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, no. SAND2016–11799J, pp. 1–11.

17. Liu W., Winfield A. F., Sa J., Chen J, Dou L. Towards energy optimization: emergent task allocation in a swarm of foraging robots, *Adaptive behavior*, 2007, vol. 15, no. 3. pp. 289–305.

18. Yan Z., Fabresse L., Laval J., Bouraqadi N. Team size optimization for multi-robot exploration, *4th international conference on simulation, modeling and programming for autonomous robots (SIMPAR 2014)*, Springer, 2014, pp. 554–565.

19. Yan Z., Fabresse L., Laval J., Bouraqadi N. Building a ROS-based testbed for realistic multi – robot simulation: taking the exploration as an example, *Robotics*, 2017, vol. 6, iss. 21. pp. 1–21.

20. Gong D., Yan J., Zuo G. A review of gait optimization based on evolutionary computation, *Applied computational intelligence and soft computing*, 2010, Article ID 413179, pp. 1–12.

21. Darintsev O. V. and Migranov A. B. The Use of Genetic Algorithms for Distribution of Tasks in Groups of Mobile Robots with Minimization of Energy Consumption, 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1–6, doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934927.

22. Darintsev O., Migranov A. Task Distribution Module for a Team of Robots Based on Genetic Algorithms: Synthesis Methodology and Testing, 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP), Samara, Russia, 2019, pp. 296–300, doi: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976649.

23. Darintsev O. V., Migranov A. B., Yudintsev B. S. Neural network algorithm for trajectory planning for a group of mobile robots, *Artificial Intelligence*, 2011, vol. 1, pp. 154–160 (in Russian).

В. Ф. Филаретов, д-р техн. наук, проф., зав. лаб., filaretov@inbox.ru,

А. С. Губанков, канд. техн. наук, доц., gubankov@iacp.dvo.ru,

И. В. Горностаев, аспирант, gornostaev\_iv@mail.ru,

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток

# Метод формирования программной скорости движения рабочего инструмента многостепенного манипулятора<sup>1</sup>

Рассмотрено решение задачи повышения производительности робототехнических систем, в состав которых входят многостепенные манипуляторы, а их исполнительные элементы имеют ограничения по мощности. Для решения этой задачи разработан метод автоматического формирования предельно высоких программных скоростей движения рабочих инструментов указанных манипуляторов, позволяющий сохранить заданную динамическую точность управления с учетом взаимовлияний между всеми их степенями подвижности и заданных ограничений на входные сигналы электроприводов.

Созданный метод заключается в вычислении максимально допустимой скорости движения рабочего инструмента манипулятора. Основной особенностью метода являются условия выбора требуемых данных для быстрого расчета всех необходимых параметров управления.

На основе предложенного метода синтезирована система формирования скорости движения рабочего инструмента трехзвенного манипулятора с поворотными степенями подвижности, приводимыми в движение двигателями постоянного тока. Этот манипулятор может перемещать рабочие инструменты по произвольным гладким пространственным траекториям, построенным с помощью параметрических сплайнов третьего порядка. Выполненное моделирование подтвердило высокую эффективность предложенного метода в сравнении с другими известными методами задания программной скорости и позволило существенно повысить программную скорость движения рабочих инструментов за счет непрерывной работы хотя бы одного из электроприводов манипулятора вблизи зоны насыщения его усилителя мощности без входа в нее. При этом повышение быстродействия системы происходило без уменьшения динамической точности.

Разработанный метод может быть применен для формирования предельно высокой программной скорости движения рабочих инструментов манипуляторов с любыми кинематическими схемами и различным числом степеней подвижности.

**Ключевые слова:** многостепенной манипулятор, ограничения, формирование скорости, высокая точность, программные сигналы

#### Введение

Повышение скорости выполнения технологических операций (ТО) многостепенными манипуляторами (ММ) сопряженно с увеличением силомоментных взаимодействий между их степенями подвижности, что, как показано в работе [1], приводит к значительному увеличению сигналов управления самонастраивающимися корректирующими устройствами, компенсирующими возникшие взаимовлияния. Это может привести к тому, что один или сразу несколько электроприводов ММ войдут в режим насыщения, при котором их рабочие инструменты (РИ) могут сойти с предписанных траекторий движения, вызывая появление аварийных ситуаций.

Традиционным и наиболее распространенным подходом к решению задачи формирования программной скорости движения РИ ММ является применение профилей скорости [2], определяющих зависимость этой скорости от времени. Несмотря на простоту реализации этот подход предполагает настройку скорости исходя из наиболее нагруженных режимов работы MM, что приводит к значительному занижению скорости даже в благоприятных условиях работы.

В работах [3—9] описаны подходы к заданию оптимальной скорости движения РИ ММ. Эти подходы позволяют учитывать ограничения на скорость движения каждой степени подвижности ММ [3-7], ускорения [3-8] и даже на производные этих ускорений [3-5, 9]. В работе [10] рассмотрен подход к решению задачи оптимального по быстродействию управления движением РИ ММ с учетом ограничений на управляющие моменты в электроприводах. Общим недостатком перечисленных подходов является необходимость задания ограничений на указанные скорости и ускорения, которые с учетом силомоментных взаимовлияний между всеми степенями подвижности ММ на различных участках траекторий их движения могут существенно изменяться. Однако задачи определения переменных значений этих ограничений в указанных работах не решаются, что снижает возможность применения описанных методов.

В работе [11] предложены алгоритмы оптимального и квазиоптимального по быстродей-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках грантов № 20-38-70161, 20-08-00701, 19-08-00347.

ствию контурного управления MM с учетом ограничений на управляющие моменты в электроприводах. Однако их применение на практике заставляет системы управления (СУ) работать в режиме высокочастотных переключений со всеми присущими этому режиму недостатками.

В работе [12] представлен метод автоматического формирования программных скоростей движения РИ ММ с учетом динамических ошибок их пространственных перемещений, а в работе [13] — метод, обеспечивающий автоматическое формирование программной скорости по значениям входных напряжений и якорных токов всех электроприводов ММ. Общим недостатком этих методов является то, что они только косвенно позволяют учесть вход в насыщение усилителей мощности и электроприводов ММ. В результате для их использования необходимо заранее проводить многократное моделирование движения РИ ММ для каждой конкретной траектории, настраивая параметры синтезируемых СУ.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что решение задачи высокоскоростного управления движением РИ ММ с учетом ограничений по управляющим сигналам все еще далеко от своего эффективного решения.

#### 1. Постановка задачи

Целью работы является создание метода автоматического формирования предельно высокой скорости движения РИ ММ по заранее задаваемым параметрическими сплайнами траекториям, при которой сохраняется требуемая динамическая точность управления, а усилители мощности и электроприводы ММ неизменно работают в линейной зоне без входа в режим насыщения.

#### 2. Особенности объекта управления

Рассматривается MM с кинематической схемой типа PUMA, но общность решаемой задачи сохраняется и для манипуляторов с иными кинематическими схемами. Влиянием ориентирующих степеней подвижности, расположенных вблизи PU, будем пренебрегать, так как их силовое и моментное воздействие на переносные степени пренебрежимо мало. Кроме того, полагаем, что все электроприводы MM работают в линейной зоне усиления усилителей мощности, где их СУ обеспечивают требуемую динамическую точность работы, при которой обобщенные координаты  $q_i$  MM мало отличаются от их программных значений  $q_i^*$ . Это позволяет пренебречь детальным описанием регуляторов, не нарушая работоспособности предлагаемого метода.

Исполнительными элементами ММ являются электродвигатели постоянного тока с постоянными магнитами. Уравнения электрической и механической цепей *i*-го электропривода при малых значениях индуктивности якорной цепи, а также вязкого и сухого трения имеют вид [1]

$$\begin{split} R_i I_i + K_{\omega i} \dot{i}_{pi} \dot{q}_i &= K_{yi} U_i; \\ M_{\text{дB}i} &= K_{Mi} I_i = J_{Ei} \dot{i}_{pi} \ddot{q}_i + P_i / i_{pi}, \end{split} \tag{1}$$

где  $i = \overline{1,3}$  — номер *i*-й переносной степени подвижности MM;  $q_i$ ,  $\dot{q}_i$ ,  $\ddot{q}_i$  — соответственно значения обобщенных координат ММ, а также их скоростей и ускорений;  $R_i$  — активные сопротивления якорных цепей электродвигателей; *J*<sub>*Ei*</sub> — суммарные моменты инерции их роторов и приведенных к ним моментов инерции вращающихся частей редукторов; *i<sub>ni</sub>* — передаточные числа редукторов;  $K_{Mi}$  и  $K_{\omega i}^{\mu}$  - соответственно коэффициенты крутящих моментов и противоЭДС;  $K_{vi}$ ,  $U_i$  — соответственно коэффициенты усиления усилителей мощности электродвигателей и напряжения на их входах;  $I_i$  — якорный ток электродвигателя;  $M_{_{\rm ЛB}i}$  — общий момент, развиваемый і-м электродвигателем;  $P_i$  — моменты, возникающие на выходном валу редуктора і-го сочленения при произвольном движении манипулятора.

Обобщенное моментное воздействие  $P_i$  имеет вид [1]

$$P_i = H_i \ddot{q}_i + h_i \dot{q}_i + M_{\text{BH}i}, \qquad (2)$$

где  $H_i$  — компонента, характеризующая инерционные свойства соответствующей части манипулятора;  $h_i$  — составляющая момента, пропорциональная  $\dot{q}_i$ ;  $M_{\rm BHi}$  — моментное воздействие на *i*-е сочленение манипулятора, учитывающее гравитационные силы и взаимовлияния его степеней подвижности в процессе движения.

С учетом выражений (1) и (2) уравнение нагруженного электропривода в *i*-й степени подвижности манипулятора может быть представлено в виде [1]

$$R_{i}(H_{i} + J_{Ei}i_{pi}^{2})\ddot{q}_{i} + (R_{i}h_{i} + K_{Mi}K_{\omega i}i_{pi}^{2})\dot{q}_{i} + R_{i}M_{\text{BH}i} = K_{Mi}K_{yi}i_{pi}U_{i}.$$
(3)

Выражение (3) будет использовано при создании метода автоматического формирования предельно высокой скорости движения РИ ММ.

#### 3. Уравнение движения РИ ММ

Движение РИ ММ на предельно высокой скорости будет обеспечиваться при условии, что хотя бы один из его электроприводов с учетом текущей нагрузки будет работать на пределе своей мощности, вращаясь с предельно высокими скоростью и ускорением вблизи зоны нелинейных искажений усилителя мощности, но не будет входить в нее. В результате при согласованном управлении всеми остальными электроприводами ММ удастся обеспечить предельно высокую переменную скорость *v* движения РИ по любым гладким пространственным траекториям в декартовой системе координат (СК) *Охуг*, связанной с основанием MM.

Уравнение (3) описывает зависимость обобщенной скорости  $\dot{q}_i$  и ускорения  $\ddot{q}_i$  электропривода от его входного напряжения U<sub>i</sub> при текущих значениях  $H_i$ ,  $h_i$ ,  $M_{\text{вн}i}$ . Но с учетом кинематики ММ и текущего положения РИ на траектории уравнение (3) желательно было бы переписать так, чтобы оно описывало зависимость скорости у и ускорения  $\dot{v}$  движения РИ от  $U_{i}$ . Тогда, задавая значение  $U_i$  для одного из электроприводов MM предельно допустимым, с помощью нового уравнения можно было бы получить закон изменения предельных значений v и v. Однако формировать зависимости v и  $\dot{v}$  от всех текущих значений  $U_i$ при произвольном пространственном движении РИ ММ сложно, так как потребуется в реальном масштабе времени определять все необходимые переменные параметры нового уравнения, используя сигналы  $q_i$ ,  $\dot{q}_i$  и  $\ddot{q}_i$  всех электроприводов ММ, поступающих с датчиков всех его степеней подвижности. Поэтому в работе предлагается применять приближенный метод расчета программных значений  $v^*$  и  $\dot{v}^*$  при движении РИ вдоль траекторий, используя в уравнении (3) вместо сигналов  $q_i$ ,  $\dot{q}_i$  и  $\ddot{q}_i$  близкие к ним их программные значения  $q_i^{*}, \dot{q}_i^{*}$  и  $\ddot{q}_i^{*}$ , если все электроприводы ММ работают в линейной зоне их усилителей мощности, их следящие системы обеспечивают им высокую динамическую точность управления, а программные траектории движения РИ ММ задаются гладкими параметрическими сплайнами Безье третьего порядка.

В результате для установления зависимости закона изменения  $v^*$  и  $\dot{v}^*$  от соответствующих предельных значений  $U_i$  с учетом текущей кинематики и динамики конкретного MM, а также заранее заданной траектории движения его РИ программные значения обобщенных скоростей  $\dot{q}_i^*$  и ускорений  $\ddot{q}_i^*$ , как будет показано ниже, должны быть выражены, соответственно, через программные значения v и  $\dot{v}^*$  движения РИ.



Рис. 1. Программная траектория движения РИ MM Fig. 1. Reference trajectory of movement of the multilink manipulator working tool

Для указанного преобразования уравнения (3) вначале необходимо получить аналитические зависимости  $\dot{q}_i^*$  и  $\ddot{q}_i^*$  от  $v^*$  и  $\dot{v}^*$ . Для этого требуется установить закон изменения обоб-щенных координат  $q_i^*$  при перемещении программной точки по траекториям, задаваемым указанными сплайнами [14], проходящими через набор заданных точек, и дважды его продифференцировать по времени. Коэффициенты этих сплайнов, описываемых полиномами третьей степени, формируются так, чтобы обеспечить непрерывность первых и вторых производных координат x, y и z по их параметру  $\tau$ на концах каждого сплайна, т. е. гарантировать совпадение касательных в точках сопряжения всех сплайнов и равенство радиусов их кривизны в этих точках.

На рис. 1 показана траектория движения РИ ММ, состоящая из множества параметрических сплайнов Безье третьего порядка [14]. Движение по k-му сплайну начинается в точке  $P_{k,0}$  при значении параметра  $\tau = 0$  и заканчивается в точке  $P_{k,3}$ , когда  $\tau = 1$ , а точки  $P_{k,1}$ и P<sub>k.2</sub> определяют вид кривой сплайна. Когда РИ переходит на (k + 1)-й сплайн, параметр т обнуляется, но векторы  $v^*$  в конце *k*-го сплайна, где  $\tau = 1$ , и в начале следующего (k + 1)-го сплайна, где  $\tau = 0$ , остаются равными, хотя при переходе от k-го к (k + 1)-му сплайну происходит скачкообразное изменение параметра  $\tau$  с 1 на 0. Это обеспечивается за счет раздельного расчета  $\mathbf{v}^*$  на конце k-го и в начале k + 1-го сплайнов по представленным ниже аналитическим выражениям, в которых точка сопряжения не является точкой разрыва.

Каждый *k*-й сплайн, являясь частью программной траектории движения РИ, задается параметрическими полиномами третьей степени [15]:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{x,k} & B_{x,k} & C_{x,k} & D_{x,k} \\ A_{y,k} & B_{y,k} & C_{y,k} & D_{y,k} \\ A_{z,k} & B_{z,k} & C_{z,k} & D_{z,k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau^3 \\ \tau^2 \\ \tau \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $A_{x,k}, A_{y,k}, A_{z,k}, B_{x,k}, B_{y,k}, B_{z,k}, C_{x,k}, C_{y,k}, C_{z,k}, D_{x,k}, D_{y,k}, D_{z,k}$ — коэффициенты *k*-го сплайна при соответствующий степенях параметра  $\tau \in [0, 1]$ , определяемые координатами точек  $P_{k,0}, P_{k,1}, P_{k,2}, P_{k,3}$ .

 $P_{k,2}, P_{k,3}$ . В этом случае закон изменения значений обобщенных координат  $q_i^*$  при движении программной точки по *k*-му сплайну (4) можно описать системой, состоящей из трех нелинейных уравнений [2] и формируемой на основе аналитического решения обратной задачи кинематики (O3K):

$$q_i^*(t) = f_i(x(\tau(t)), y(\tau(t)), z(\tau(t))),$$
(5)

где  $x(\tau(t))$ ,  $y(\tau(t))$  и  $z(\tau(t))$  — изменяющиеся во времени координаты программной точки, задаваемые параметрическими сплайнами Безье третьего порядка в СК *Охуz*; t — время (для удобства записи далее опускается).

В целях получения соотношений для  $\dot{q}_i^*$  и  $\ddot{q}_i^*$  в функции  $v^*$  и  $\dot{v}^*$  вначале продифференцируем выражение (5) по времени. В результате будем иметь

$$\dot{q}_{i}^{*} = \left(\frac{\partial f_{i}}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial \tau} + \frac{\partial f_{i}}{\partial y}\frac{\partial y}{\partial \tau} + \frac{\partial f_{i}}{\partial z}\frac{\partial z}{\partial \tau}\right)\frac{d\tau}{dt}.$$
 (6)

Для получения производных  $\partial x/\partial \tau$ ,  $\partial y/\partial \tau$ ,  $\partial z/\partial \tau$  продифференцируем выражение (4) по *t*. В результате получим

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3A_{x,k} & 2B_{x,k} & C_{x,k} \\ 3A_{y,k} & 2B_{y,k} & C_{y,k} \\ 3A_{z,k} & 2B_{z,k} & C_{z,k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau^2 \\ \tau \\ 1 \end{bmatrix} \frac{d\tau}{dt} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \frac{d\tau}{dt}, \quad (7)$$

где  $3A_{x,k}\tau^2 + 2B_{x,k}\tau + C_{x,k} = \partial x/\partial \tau = F_x$ ,  $3A_{y,k}\tau^2 + 2B_{y,k}\tau + C_{y,k} = \partial y/\partial \tau = F_y$ ,  $3A_{z,k}\tau^2 + 2B_{z,k}\tau + C_{z,k} = \partial z/\partial \tau = F_z$ .

Поскольку  $v^* = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}$ , то с учетом выражения (7) можно записать  $v^* = d\tau/dt \times \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$  и, соответственно, [15]

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{v^*}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}}.$$
 (8)

Знак  $v^*$  определяет направление перемещения РИ по траектории. Если  $v^* > 0$ , то программная точка движется от начала сплайна  $P_{k,0}$  к его концу  $P_{k,3}$ , а если  $v^* < 0$ , то движение происходит в обратную сторону. При достиже-

нии программной точкой конца *k*-го сплайна, где  $\tau = 1$  для  $v^* > 0$ , происходит обнуление параметра  $\tau$ , и номер сплайна меняется на k + 1. Если же программная точка находится в начале *k*-го сплайна, где  $\tau = 0$  и  $v^* < 0$ , то  $\tau$  становится равным 1, и номер сплайна меняется на k - 1.

С учетом соотношений (7) и (8) выражение (6) может переписать в виде

$$\dot{q}_{i}^{*} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{i}}{\partial x} & \frac{\partial f_{i}}{\partial y} & \frac{\partial f_{i}}{\partial z} \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} F_{x} \\ F_{y} \\ F_{z} \end{bmatrix} \frac{v^{*}}{\sqrt{F_{x}^{2} + F_{y}^{2} + F_{z}^{2}}} = \mathbf{g}_{i} \mathbf{a} v^{*}, \tag{9}$$

где  $\mathbf{g}_i = \left[\frac{\partial f_i}{\partial x} \quad \frac{\partial f_i}{\partial y} \quad \frac{\partial f_i}{\partial z}\right]$  — вектор-строка первых производных;  $\mathbf{a} = \frac{[F_x \ F_y \ F_z]^{\mathrm{T}}}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}}$  — единичный вектор, совпадающий с направлением

ничный вектор, совпадающий с направлением вектора скорости  $\mathbf{v}^* = \mathbf{a}\mathbf{v}^* = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z}]^T$  в СК *Охуz*.

С учетом соотношения (9) можно записать

$$\ddot{q}_{i}^{*} = \dot{\mathbf{g}}_{i} \mathbf{a} v^{*} + \mathbf{g}_{i} \dot{\mathbf{a}} v^{*} + \mathbf{g}_{i} \mathbf{a} \dot{v}^{*} =$$

$$= \mathbf{g}_{i} \mathbf{a} \dot{v}^{*} + (\mathbf{a}^{T} \mathbf{G}_{i} \mathbf{a} v^{*} + \mathbf{g}_{i} \dot{\mathbf{a}}) v^{*}, \qquad (10)$$

$$\Pi \mathbf{G} \qquad \dot{\mathbf{g}}_{i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial x^{2}} \dot{x} + \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial x \partial y} \dot{y} + \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial x \partial z} \dot{z} \\ \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial x \partial y} \dot{x} + \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial y^{2}} \dot{y} + \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial y \partial z} \dot{z} \\ \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial x \partial z} \dot{x} + \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial y \partial z} \dot{y} + \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial z^{2}} \dot{z} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} = \\ = \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial x^{2}} & \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial y^{2}} & \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial x \partial z} & \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial y \partial z} & \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial y \partial z} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \mathbf{a} \\ \dot{\mathbf{a}} = \frac{1}{\sqrt{F_{x}^{2} + F_{y}^{2} + F_{z}^{2}}} \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{x}}{\partial \tau} \\ \frac{\partial F_{y}}{\partial \tau} \\ \frac{\partial F_{y}}{\partial \tau} \\ \frac{\partial F_{z}}{\partial \tau} \end{bmatrix}^{d} \mathbf{d} + \\ + \begin{bmatrix} F_{x} \\ F_{y} \\ F_{z} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{\sqrt{F_{x}^{2} + F_{y}^{2} + F_{z}^{2}}} \right); \end{cases}$$
(11)

**G**<sub>*i*</sub> — симметричная матрица вторых производных.

Мехатроника, автоматизация, управление, Том 21, № 12, 2020

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}}\right) = \\ = -\frac{F_x W_x + F_y W_y + F_z W_z}{(F_x^2 + F_y^2 + F_z^2)^{3/2}} \frac{d\tau}{dt},$$

где  $W_x = \partial^2 x / \partial \tau^2 = 2(3A_{x,k}\tau + B_{x,k}), W_y = \partial^2 y / \partial \tau^2 =$ =  $2(3A_{y,k}\tau + B_{y,k}), W_z = \partial^2 z / \partial \tau^2 = 2(3A_{z,k}\tau + B_{z,k}),$ выражение (11) можно переписать сначала в виде

$$\dot{\mathbf{a}} = \frac{1}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}} \begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} \frac{d\tau}{dt} - \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \frac{F_x W_x + F_y W_y + F_z W_z}{(F_x^2 + F_y^2 + F_z^2)^{3/2}} \frac{d\tau}{dt},$$

а после подстановки в него  $d\tau/dt$  (8) — в виде

$$\dot{\mathbf{a}} = \left( \begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \frac{F_x W_x + F_y W_y + F_z W_z}{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \right) \times$$
(12)
$$\times \frac{v^*}{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} = \tilde{\mathbf{a}} v^*.$$

С учетом (12) выражение (10) можно переписать в виде

$$\ddot{q}_i^* = \mathbf{g}_i \mathbf{a} \dot{v}^* + (\mathbf{a}^{\mathrm{T}} \mathbf{G}_i \mathbf{a} + \mathbf{g}_i \tilde{\mathbf{a}}) v^{*2}, \qquad (13)$$

где слагаемые  $\mathbf{a}^{\mathsf{T}}\mathbf{G}_{i}\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{g}_{i}\tilde{\mathbf{a}}$  и  $\mathbf{g}_{i}\mathbf{a}$  после выполнения соответствующих матричных операций становятся скалярами.

Полученные соотношения (9) и (13), описывающие связь программных значений  $\dot{q}_i^*$ ,  $\ddot{q}_i^*$  и  $v^*$ ,  $\dot{v}^*$ , с учетом подхода, предложенного выше, можно подставить вместо  $\dot{q}_i$  и  $\ddot{q}_i$  в уравнение (3) для установления искомой зависимости законов изменения  $\dot{v}^*$  и  $v^*$  от соответствующих предельных значений  $U_i$ . Однако, как показано в работе [1], величины  $q_i$ ,  $\dot{q}_i$  и  $\ddot{q}_i$  входят и в величины  $H_i$ ,  $h_i$  и  $M_{\text{вн}i}$  в выражении (2). Поэтому их следует также заменить в  $H_i$ ,  $h_i$  и  $M_{\text{вн}i}$  выражения (2) на соответствующие программные значения  $q_i^*$ ,  $\dot{q}_i^*$ ,  $\ddot{q}_i^*$ . В итоге получим программные компоненты

$$H_{i}^{*}(q_{j}^{*}), i < j,$$

$$h_{i}^{*}(q_{j}^{*}, \dot{q}_{j}^{*}) = \sum_{j=1}^{3} (s_{j,i}(q_{j}^{*}) \dot{q}_{j}^{*}), i < j,$$
(14)

$$M^{*}_{BHi}(\mathbf{q}^{*}, \dot{q}^{*}_{j}, \ddot{q}^{*}_{j}) = s_{4,i}(q^{*}) + \sum_{j=1}^{3} (s_{j+4,i}(q^{*})\ddot{q}^{*}_{j} + s_{j+7,i}(q^{*})\dot{q}^{*2}_{j}),$$
(15)

где  $i = \overline{1,3}, j = \overline{1,3}, i \neq j;$   $\mathbf{q}^* = [q_1^* q_2^* q_3^*]^{\mathsf{T}}$  — вектор обобщенных координат;  $s_{j,i}$  — функции программных координат, некоторые из которых обнуляются. Индексы всех  $s_{j,i}$  в соотношениях (14) и (15) выбраны так, чтобы для каждой *i*-й степени подвижности при  $j = \overline{1,3}$  были обозначены все возможные функции  $s_{j,i}$  — первые три при различных обобщенных скоростях  $\dot{q}_j^*$  в (14), четвертая  $s_{4,i}$  (составляющая гравитационных сил) в выражении (15) и остальные шесть при различных  $\ddot{q}_i^*$  и  $\dot{q}_i^{*2}$  в (15).

шесть при различных  $\ddot{q}_{j}^{*}$  и  $\dot{q}_{j}^{*2}$  в (15). После подстановки компонент  $H_{i}^{*}$ ,  $h_{i}^{*}$  (14) и  $M_{_{\rm BH}i}^{*}$  (15) в выражение (3) получим

$$R_{i}(H_{i}^{*} + J_{Ei}i_{pi}^{2})\ddot{q}_{i}^{*} + \left(R_{i}\sum_{j=1}^{3}(s_{j,i}\dot{q}_{j}^{*}) + K_{Mi}K_{\omega i}i_{pi}^{2}\right)\dot{q}_{i}^{*} + \left(R_{i}\left(s_{4,i} + \sum_{j=1}^{3}(s_{j+4,i}\ddot{q}_{j}^{*} + s_{j+7,i}\dot{q}_{j}^{*2})\right)\right) = K_{Mi}K_{yi}i_{pi}U_{i}, \quad i \neq j.$$
(16)

Заменив  $\dot{q}_i^*$  и  $\ddot{q}_i^*$  в уравнении (16), используя (9) и (13), получим

$$R_{i}(H_{i}^{*} + J_{Ei}i_{pi}^{2})(\mathbf{g}_{i}\mathbf{a}\dot{v}^{*} + (\mathbf{a}^{T}\mathbf{G}_{i}\mathbf{a} + \mathbf{g}_{i}\tilde{\mathbf{a}})v^{*2}) + \\ + \left(R_{i}\sum_{j=1}^{3}(s_{j,i}\mathbf{g}_{j})\mathbf{a}v^{*} + K_{Mi}K_{\omega i}i_{pi}^{2}\right)\mathbf{g}_{i}\mathbf{a}v^{*} + \\ -R_{i}\left(s_{4,i} + \sum_{j=1}^{3}(s_{j+4,i}(\mathbf{g}_{j}\mathbf{a}\dot{v}^{*} + (\mathbf{a}^{T}\mathbf{G}_{j}\mathbf{a} + \mathbf{g}_{j}\tilde{\mathbf{a}})v^{*2}) + \\ + s_{j+7,i}(\mathbf{g}_{j}\mathbf{a})^{2}v^{*2})\right) - K_{Mi}K_{yi}i_{pi}U_{i} = \\ = \dot{v}^{*}\left[R_{i}((H_{i}^{*} + J_{Ei}i_{pi}^{2})\mathbf{g}_{i}\mathbf{a} + \sum_{j=1}^{3}(s_{j+4,i}\mathbf{g}_{j})\mathbf{a})\right] + (17) \\ + v^{*2}\left[R_{i}((H_{i}^{*} + J_{Ei}i_{pi}^{2})(\mathbf{a}^{T}\mathbf{G}_{i}\mathbf{a} + \mathbf{g}_{i}\tilde{\mathbf{a}}) + \\ + \sum_{j=1}^{3}((s_{j,i}\mathbf{g}_{j})\mathbf{a}\mathbf{g}_{i}\mathbf{a} + s_{j+4,i}(\mathbf{a}^{T}\mathbf{G}_{j}\mathbf{a} + \mathbf{g}_{j}\tilde{\mathbf{a}}) + \\ + s_{j+7,i}(\mathbf{g}_{j}\mathbf{a})^{2}))\right] + v^{*}(K_{Mi}K_{\omega i}i_{pi}^{2}\mathbf{g}_{i}\mathbf{a}) + \\ + (R_{i}s_{4,i} - K_{Mi}K_{yi}i_{pi}U_{i}) = \\ = \dot{v}^{*}a_{i} + v^{*2}b_{i} + v^{*}c_{i} + d_{i} = 0, \quad i \neq j. \end{cases}$$

где

$$a_{i} = [R_{i}((H_{i}^{*} + J_{Ei}i_{pi}^{2})\mathbf{g}_{i}\mathbf{a} + \sum_{j=1}^{3}(s_{j+4,i}\mathbf{g}_{j})\mathbf{a})],$$
  

$$b_{i} = [R_{i}((H_{i}^{*} + J_{Ei}i_{pi}^{2})(\mathbf{a}^{T}\mathbf{G}_{i}\mathbf{a} + \mathbf{g}_{i}\tilde{\mathbf{a}}) + \sum_{j=1}^{3}((s_{j,i}\mathbf{g}_{j})\mathbf{a}\mathbf{g}_{i}\mathbf{a} + s_{j+4,i}(\mathbf{a}^{T}\mathbf{G}_{j}\mathbf{a} + \mathbf{g}_{j}\tilde{\mathbf{a}}) + s_{j+7,i}(\mathbf{g}_{j}\mathbf{a})^{2}))],$$
  

$$c_{i} = K_{Mi}K_{\omega i}i_{pi}^{2}\mathbf{g}_{i}\mathbf{a},$$
  

$$d_{i} = R_{i}s_{4,i} - K_{Mi}K_{\nu i}i_{pi}U_{i}, i \neq j.$$

Решая нелинейные дифференциальные уравнения первого порядка (17), в которых вместо  $U_i$  $(i = \overline{1,3})$  подставляются их предельно допустимые значения, при которых любой из электроприводов MM будет находиться в преднасыщенном состоянии, можно определить предельно допустимое значение  $v^*$ . При перемещении РИ по траектории с этой скоростью согласно (4), (5) и (8) будут автоматически формироваться программные сигналы  $q_i^*$  для следящих электроприводов всех степеней подвижности MM.

#### 4. Описание работы системы формирования программной скорости движения РИ ММ

Ниже рассмотрен алгоритм формирования предельно скоростного движения РИ по траектории, заранее задаваемой параметрическими сплайнами (4), и описана работа системы, реализующей этот алгоритм.

Выполнение алгоритма начинается с построения в рабочей области ММ с помощью выражения (4) программной траектории движения РИ в СК, связанной с его основанием, и расчета программных сигналов  $q_i^*$  (5), соответствующих исходному положению программной точки (k = 0 и  $\tau = 0$ ).

Перемещение этой точки по построенной программной траектории начинается после расчета значения начальной скорости  $v^*(\Delta t)$ , где  $\Delta t > 0$  —

шаг дискретизации системы. Для расчета  $v^*(\Delta t)$  с начальным условием  $v^*(0) = 0$  для всех трех степеней подвижности ММ формируются три пары уравнений (17), и в них в слагаемые  $d_i$  вместо значений  $U_i$  ( $i = \overline{1,3}$ ) подставляются их предельно допустимые значения с противоположными знаками. Все эти уравнения решаются на шаг  $\Delta t$ и определяются соответствующие им шесть значений скорости  $v^*(\Delta t)$ . Из них выбирается то, которое в своей паре (для *i*-го электропривода) является максимальным, но не превышающим наибольшего значения в других парах, при котором хотя бы один электропривод находится в преднасыщенном состоянии, а остальные — в отдалении от насыщения. Именно выбранное значение  $v^*(\Delta t)$  используется для последующего расчета  $d\tau/dt$  (8) при определении нового значения  $\tau$  и соответствующего ему положения программной точки (4) и координат  $q_i^*(\Delta t)$  (5). При этом величина  $v^*$  не должна превышать и предельно допустимого значения для конкретного вида работы.

В последующем во время движения MM только на входе выбранного электропривода будет формироваться предельное значение  $U_i$ , а входные напряжения других электроприводов будут определяться их регуляторами, обеспечивая согласованное движение всех степеней подвижности MM и точное перемещение РИ по заданной траектории.

Расчет значений  $v^*(N\Delta t)$  (N = 2, 3, ..., K, где K определяет последнее положение программной точки) для следующего и последующих дискретных моментов времени осуществляется аналогично. Но шесть уравнений (17) будут формироваться уже с учетом текущего положения программной точки на траектории, координат  $q_i^*((N-1)\Delta t)$  ММ (5) и текущего значения  $v^*((N-1)\Delta t)$ , используемого в качестве очередного начального условия. Эта процедура повторяется до начала торможения РИ в конце траектории.

В результате для каждого реального дискретного момента времени t будут рассчитаны программные сигналы  $q_i^*(t)$ , которые после запуска ММ в реальном масштабе времени будут поступать на входы его следящих электроприводов, обеспечивая предельно быстрое движение РИ, при котором все электроприводы ММ будут работать в линейной зоне усиления без входа в режим насыщения.

На рис. 2 показана обобщенная схема системы формирования программной скорости



Рис. 2. Схема системы формирования программной скорости движения РИ MM Fig. 2. Scheme of the system of formation of reference movement speed of the multilink manipulator working tool

движения РИ ММ. На этом рисунке введены следующие обозначения: БФС — блок формирования  $v^{*}(t)$ ; БФТ — блок задания траектории движения РИ (программных значений x, y, z) в СК *Охуz*; **С** = { $A_{x,k}, A_{y,k}, A_{z,k}, B_{x,k}, B_{y,k}, B_{z,k}, C_{x,k}, C_{y,k}, C_{z,k}, D_{x,k}, D_{y,k}, D_{z,k}$ } — массив коэффициентов, описывающих k-й сплайн; ОЗК блок решения обратной задачи кинематики (формирования программных значений обобщенных координат  $q_i^*$   $(i = \overline{1,3})$ ;  $\Im \Pi_i (i = \overline{1,3})$ электроприводы постоянного тока с усилителями мощности, обеспечивающие повороты соответствующих степеней подвижности ММ:  $TP_i$  (*i* = 1,3) — типовые регуляторы, обеспечивающие требуемые показатели качества работы каждого замкнутого электропривода; СКУ; (i = 1,3) — самонастраивающиеся корректирующие устройства, стабилизирующие параметры каждого электропривода при взаимовлияниях между степенями подвижности движущегося ММ [1];  $\varepsilon_i$  (*i* = 1,3) — ошибки соответствующих ЭП<sub>і</sub>.

Вначале рассмотрим работу системы, когда траектория движения РИ, представляемая в виде сплайнов, полностью известна и неизменна. В этом случае все ее параметры заносятся в БФТ. Перед началом движения РИ на выходе Б $\Phi$ C (рис. 2)  $v^* = 0$ . Исходное положение РИ ММ в начале первого сплайна (исходные программные координаты —  $x_0, y_0$  и  $z_0$ ) рассчитывается с использованием выражения (4), определямассивом коэффициентов ется C, когда  $\tau = 0$  и k = 0, и формируется на выходе БФТ. На выходе блока ОЗК с использованием координат  $x_0, y_0$  и  $z_0$  формируются программные сигналы  $q_i^*$  (*i* = 1,3) (5), которые отрабатываются всеми следящими электроприводами ММ, и система приходит в исходное состояние.

Затем в БФС с учетом текущих значений  $\tau$ , k и **C** вычисляются элементы векторов **a** (9) и  $\tilde{\mathbf{a}}$  (12), а с учетом  $q_i^*$  ( $i = \overline{1,3}$ ) — элементы векторов  $\mathbf{g}_i$  и матриц  $\mathbf{G}_i$  (i = 1,3), входящих в выражения (9) и (13), а также  $H_i^*$  и  $s_{j,i}, s_{4,i}, s_{j+4,i},$  $s_{j+7,i}(j=\overline{1,3}, i=\overline{1,3}, j\neq i)$ , входящие в  $h_i^*$  (14) й  $\dot{M}^*_{\rm BHi}$  (15). Все эти элементы, векторы и матрицы используются в БФС при решении шести указанных выше уравнений (17) при различных предельных значениях  $U_i$  и начальном условии  $v^{*}(0) = 0$ . После выбора одного из шести решений  $v(\Delta t)$  оно используется для расчета в БФТ очередных значений  $d\tau/dt$  (8),  $\tau$ , k, **С** и новых координат РИ  $x(\Delta t)$ ,  $y(\Delta t)$ ,  $z(\Delta t)$  (4), которые поступают в блок ОЗК для вычисления  $q_i^*(\Delta t)$  (5). Эти значения сохраняются в памяти блока ОЗК, но на входы следящих электроприводов не поступают.

Описанная процедура расчета новых значений  $v^*(N\Delta t)$  и  $q_i^*(N\Delta t)$  (N = 1, 2, 3,...), а также сохранения  $q_i^*(N\Delta t)$  в памяти блока ОЗК продолжается по указанному алгоритму до конца заданной траектории движения РИ. После завершения определения последовательностей  $v^*(N\Delta t)$  и  $q_i^*(N\Delta t)$  ( $i = \overline{1,3}$ , N = 1, 2, 3, ..., K) на выходы блока ОЗК в дискретные моменты времени с интервалами  $\Delta t$  начинают поступать текущие значения  $q_i^*(N\Delta t)$ , которые отрабатываются соответствующими следящими электроприводами ММ.

Если движение РИ выполняется в заранее неизвестной обстановке, требующей постоянной коррекции заданной траектории, то метод предварительного формирования фиксированной последовательности  $q_i^*(N\Delta t)$  (i = 1,3, N = 1, 2, 3,..., K) использовать уже нельзя и необходимо рассчитывать значения  $q_i^*(N\Delta t)$  непосредственно в процессе движения РИ. В результате система (рис. 2) должна успевать не только рассчитывать скорость  $v^*$  и все значения  $q_i^*(N\Delta t)$  на каждом дискретном шаге, но и отрабатывать эти сигналы соответствующими следящими электроприводами. Для этого потребуется использовать достаточно мощные вычислительные средства.

Таким образом, при использовании системы (рис. 2) будет обеспечиваться предельно быстрое движение РИ ММ по траекториям, задаваемым сплайнами. Предложенный метод можно применять для формирования программных скоростей движения РИ ММ с любыми кинематическими схемами и с различным числом степеней подвижности. При этом будут только изменяться выражения, описывающие решение ОЗК (5), и выражения для определения значений параметров  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$ ,  $d_i$ , входящих в уравнение (17).

## 5. Исследование работы системы формирования программной скорости

При исследовании разработанной на основе предложенного метода системы формирования программной скорости рассматривалось движение РИ трехстепенного ММ (см. рис. 1) по траектории, показанной на рис. 3, представленной синусоидой с амплитудой 0,38 м, расположенной под углом 45° к горизонтальной плоскости. Основание ММ расположено в начале СК *Охуz*.

Электроприводы рассматриваемого ММ имеют следующие параметры:  $R_i = 0.5$  Ом,  $K_{Mi} = 0.04$  H·м/A,  $K_{\omega i} = 0.04$  B·c/pad,  $K_{yi} = 1$ ,



Рис. 3. Программная траектория Fig. 3. Reference trajectory

 $J_{Ei} = 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ,  $i_{pi} = 100$   $(i = \overline{1,3})$ . Номинальный момент инерции  $J_{nom i}$  вала *i*-го электродвигателя и вращающихся частей редуктора, используемый в законе самонастройки (см. СКУ<sub>i</sub> на рис. 2) [1], равен  $10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . Длины звеньев MM  $l_1 = 0,5$  м,  $l_2 = 0,5$  м,  $l_3 = 0,5$  м, массы этих звеньев  $m_1 = 25$  кг,  $m_2 = 15$  кг,  $m_3 = 15$  кг, масса груза  $m_g = 5$  кг. Моменты инерции  $J_{si}$  и  $J_{ni}$  *i*-х звеньев MM относительно их продольных осей и осей, проходящих через центры масс и перпендикулярных их продольным осям, соответственно, равны  $J_{s1} = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ,  $J_{s2} = 0,007 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ,  $J_{s3} = 0,005 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ,  $J_{n2} = 0,55 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ,  $J_{n3} = 0,31 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . В качестве TP<sub>i</sub> (см. рис. 2) использованы одинаковые типовые ПИД регуляторы, описываемые уравнениями:  $U = k_p \varepsilon + k_I \int \varepsilon dt + k_d \dot{\varepsilon}$ ,  $k_p = 1883$ ,  $k_I = 130$ ,  $k_d = 140$ , где  $\varepsilon$  — ошибка управления соответствующего электропривода. Ограничения линейной зоны сигналов  $U_i$  всех электро-



приводов  $\pm 22,5$  В. Предельное значение сигнала  $U_i$ , вводимое в выражение (17), равно  $\pm 20$  В.

На рис. 4—5 показаны результаты исследования работы созданной системы.

Из приведенных графиков видно, что при перемещении РИ по гладкой траектории (см. рис. 3), составленной из четырех параметрических сплайнов (4), из точки 1 в точку 2 программные значения всех обобщенных координат  $q_i^*$  (рис. 4) изменялись плавно, а программдвижения *v*<sup>\*</sup> непрерывно ная скорость настраивалась, неизменно обеспечивая поочередную работу одного из электроприводов (рис. 5, а) в преднасыщенном состоянии. При этом увеличение v<sup>\*</sup> происходило на участках траектории с малой кривизной, а уменьшение — при подходе к участкам с большой кривизной. Отклонение *D* характерной точки РИ ММ (см. рис. 4) от заданной траектории не превышало установленного значения 0,6 мм.

Если движение MM происходит без подстройки  $v^*$  с ее предельным, но постоянным значением 0,25 м/с, при котором все электроприводы во время перемещения PU по траектории (см. рис. 3) только подходят к границе линейной зоны, не входя в насыщение, и в следящей системе (см. рис. 4) используются те же самые типовые регуляторы  $TP_i$ , то средняя скорость движения PU по указанной траектории снижается более чем в 3 раза. Законы изменения  $U_i$  всех электроприводов MM в этом случае при предельном, но постоянном значении  $v^*$ , показаны на рис. 5, *б*.

Снижение ошибки контурного управления РИ ММ возможно, но вместо типовых  $TP_i$  необходимо использовать уже более качественные регуляторы [1].

Из рис. 4 видно, что при моделировании в системе в некоторые моменты времени теряется плавность изменения  $v^*$  (например, мо-

> мент времени 2,05 с). Это связано с пренебрежением в якорных цепях электроприводов ММ (см. уравнения (3)) их индуктивностью. Это позволило в созданном методе резко снизить объем вычислений при настройке текущего значения  $v^*$ . Однако в реальных электроприводах индуктивность присутствует и, как показали проведенные исследования, при увеличении ее значения возможен выход некоторых электроприводов ММ из линейной зоны их работы. Для исклю-



Рис. 5. Законы изменения  $U_i$ , i = 1, 3Fig. 5. Behavior of  $U_i$ ,  $i = \overline{1, 3}$ 

чения этой ситуации в выражении (17) следует просто уменьшить величину  $U_i$ . Это приведет к незначительному уменьшению  $v^*$ , но производительность работы синтезированной системы все равно останется более чем в три раза выше производительности системы с постоянным предельным значением  $v^*$ , при котором будет полностью исключен выход электроприводов за пределы линейной зоны их работы и обеспечена заданная динамическая точность движения РИ по предписанной траектории.

Сравнение быстродействия работы предложенной системы с другими аналогичными системами [12, 13] при обеспечении схожей точности их работы показывает ее существенное преимущество за счет полного исключения входов всех электроприводов в режим насыщения и значительного уменьшения времени прохождения по заданным гладким траекториям.

#### Заключение

В статье рассмотрен новый метод автоматического формирования предельно высокой (переменной) программной скорости движения РИ различных ММ по траекториям, формируемым параметрическими сплайнами третьего порядка. Эта скорость обеспечивает постоянное нахождение хотя бы одного электропривода ММ в преднасыщенном состоянии (в линейной зане работы всех используемых электроприводов) при неизменном сохранении высокой динамической точности управления.

#### Список литературы

1. **Филаретов В. Ф., Зуев А. В., Губанков А. С.** Управление манипуляторами при выполнении различных технологических операций, М.: Наука, 2018. 232 с.

2. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами: Учеб. для вузов, М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 400 с.

3. Valente A., Baraldo S., Carpanzano E. Smooth trajectory generation for industrial robots performing high precision assembly processes // *CIRP Annals — Manufacturing Technology.* 2017. Vol. 66, N. 1. P. 17–20.

4. **Besset P., Bearee R.** FIR filter-based online jerk-constrained trajectory generation *// Control Engineering Practice*. 2017. Vol. 66. P. 169–180.

5. Haschke R., Weitnauer E., Ritter H. On-Line planning of time-optimal, jerk-limited trajectories // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2008. P. 3248–3253.

6. Shen P., Zhang X., Fang Y. Real-time acceleration-continuous path-constrained trajectory planning with built-in tradability between cruise and time-optimal motions. *ArXiv*, 2018. P. 1–12.

7. Шомло Я., Подураев Ю. В., Луканин В. С., Соколов А. Г. Автоматическое планирование и управление контурными движениями манипуляционных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2001. № 3. С. 28–33.

8. Bobrow J. E., Dubowsky S., Gibson J. S. Time-optimal control of robotic manipulators along specified paths // *The International Journal of Robotics Research*. 1985. Vol. 4, N. 3. P. 3–17.

9. Soon Y. J., Yun J. Ch., PooGyeon P., Seung G. Ch. Jerk limited velocity profile generation for high speed industrial robot trajectories // *IFAC Proceedings Volumes.* 2005. Vol. 38, N. 1. P. 595–600.

10. Коренченков А. А. Синтез алгоритма оптимального по быстродействию траекторного управления манипуляционными роботами // Известия КБНЦ РАН. 2011. Т. 39, № 1. С. 142—147.

11. **Чудинов В. А., Бруданов А. М.** Оптимальное формирование траекторий движения манипуляционных роботов с использованием динамического программирования // *International Scientific Journal*. 2016. № 7. С. 133—136.

12. Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А., Коноплин А. Ю. Метод синтеза системы автоматического управления режимом движения схвата манипулятора по сложным пространственным траекториям // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 6. С. 47—54.

13. Филаретов В. Ф., Губанков А. С. Система формирования предельно высокой скорости движения рабочего органа многостепенного манипулятора по произвольной траектории // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. Т. 11, № 4. С. 19–25.

14. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. М.: Мир, 2001. 604 с.

15. Filaretov V. F., Gubankov A. S., Gornostaev I. V. The formation of motion laws for mechatronics objects along the paths with the desired speed // Proc. of International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications, Jakarta, Indonesia. 2016. P. 93–96.

### The Method of Formation the Reference Speed of Movement of the Working Tool of Multilink Manipulator

V. F. Filaretov, filaretov@inbox.ru, A. S. Gubankov, gubankov@iacp.dvo.ru,

I. V. Gornostaev, gornostaev iv@mail.ru,

Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, 690041, Russian Federation

Corresponding author: Gornostaev I. V., Post Graduate Student, Institute of Automation and Control Processes, Vladivostok, 690041, Russian Federation, e-mail: gornostaev iv@mail.ru

Accepted on June, 30, 2020

#### Abstract

The solution of task of increasing the productivity of robotic systems containing multilink manipulators is presented in this paper. Their actuators have power limitations. To solve this task, a method has been developed for automatic formation of extremely high reference speeds of their working tools. This method allows to maintain a set dynamic control accuracy, taking into account interactions between all degrees of freedom of these manipulators and restrictions on input signals of their electric drives. The created method consists in calculating the maximum allowable speed of the working tool of the manipulator. The main feature of the method is conditions for selecting required data for quick calculation of all necessary control parameters. A system for forming the speed of the working tool of the manipulator with three rotational degrees of freedom was synthesized based on the proposed method. These degrees of freedom are driven by DC motors. This manipulator can move working tools along arbitrary smooth spatial trajectories formed using third-order parametric splines. The performed simulation confirmed the high efficiency of the proposed method in comparison with other known methods for forming the reference speed. This method provides significant increasing of the reference speed of the working tools due to continuous operation of at least one of the manipulator electric drives near the saturation zone of its power amplifier without entering it. At the same time, the system speed was increased without reducing dynamic accuracy. The created method can be used to generate the extremely high reference speed of the working tools of manipulators with any kinematic schemes and various numbers of degrees of freedom.

Keywords: multilink manipulator, restrictions, speed formation, high accuracy, reference signals

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (№ 20-38-70161, 20-08-00701, 19-08-00347). For citation:

Filaretov V. F., Gubankov A. S., Gornostaev I. V. The Method of Formation the Reference Speed of Movement of the Working Tool of Multilink Manipulator, Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, 2020, vol. 21, no. 12, pp. 696-705.

DOI: 10.17587/mau.21.696-705

#### References

1. Filaretov V. F., Zuev A. V., Gubankov A. S. Manipulator control during various technological operations, Moscow, Nauka, 2018, 232 p. (in Russian).

2. Zenkevich S. L., Yushchenko A. S. Robot control. Fundamentals of manipulating robot control, Moscow, Bauman MSTU Publ., 2000, 400 p. (in Russian).

3. Valente A., Baraldo S., Carpanzano E. Smooth trajectory generation for industrial robots performing high precision assembly processes, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2017, vol. 66, no. 1, pp. 17-20.

4. Besset P., Bearee R. FIR filter-based online jerk-constrained trajectory generation, Control Engineering Practice, 2017, vol. 66, pp. 169-180.

5. Haschke R., Weitnauer E., Ritter H. On-Line planning of time-optimal, jerk-limited trajectories, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008, pp. 3248-3253.

6. Shen P., Zhang X., Fang Y. Real-time acceleration-continuous path-constrained trajectory planning with built-in tradability between cruise and time-optimal motions, ArXiv, 2018, pp. 1–12.

7. Shomlo Ja., Poduraev Ju. V., Lukanin B. C., Sokolov A. G. Automatic planning and control of contour movements of manipulating robots, Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, 2001, no. 3, pp. 28-33 (in Russian).

8. Bobrow J. E., Dubowsky S., Gibson J. S. Time-optimal control of robotic manipulators along specified paths, The International Journal of Robotics Research, 1985, vol. 4, no. 3, pp. 3–17.

9. Soon Y. J., Yun J. Ch., PooGyeon P., Seung G. Ch. Jerk limited velocity profile generation for high speed industrial robot trajectories, IFAC Proceedings Volumes, 2005, vol. 38, no. 1, pp. 595-600.

10. Korenchenkov A. A. Time-optimal path control algorithm synthesis of robotic manipulators, Izvestiva KBNC RAN, 2011, vol. 39, no. 1, pp. 142-147 (in Russian).

11. Chudinov V. A., Brudanov A. M. Optimization of trajectories robotic manipulator using dynamic programming, International Scientific Journal, 2016, no. 7, pp. 133-136 (in Russian).

12. Filaretov V. F., Yukhimets D. A., Konoplin A. Yu. Method of synthesis of system of automatic control of manipulator's gripper movement mode on difficult spatial trajectories, Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, 2012, no. 6, pp. 47-54 (in Russian).

13. Filaretov V. F., Gubankov A. S. Formation of extremely high-speed motion of the effector of a multi-joint manipulator by arbitrary trajectory, Informacionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy, 2013, vol. 11, no. 4, pp. 19-25 (in Russian).

14. Rogers D. F., Adams J. A. Mathematical elements for computer graphics, McGraw-Hill, 1976, 239 p.

15. Filaretov V. F., Gubankov A. S., Gornostaev I. V. The formation of motion laws for mechatronics objects along the paths with the desired speed, Proc. of International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications, Jakarta, Indonesia, 2016, pp. 93-96. **Н. С. Воробьева**, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой, vgsxa@mail.ru, Волгоградский государственный аграрный университет, г. Волгоград,

В. В. Жога, д-р физ.-мат. наук, проф., проф., viczhoga@gmail.com,

Л. В. Жога, д-р физ.-мат. наук, доц., проф., levjog@mail.ru,

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград,

Центр технологий компонентов робототехники и мехатроники, "Университет Иннополис",

г. Иннополис, Татарстан

# Динамический синтез алгоритмов управления манипулятором параллельно-последовательной структуры<sup>1</sup>

Обсуждается разработка алгоритма динамического синтеза управляющих сигналов исполнительных приводов, обеспечивающих реализацию требуемых траекторий и законов движения рабочего органа манипулятора. Рассматривается манипулятор параллельно-последовательной структуры (гибридный), состоящий из манипулятора трипода, установленного на поворотном основании и манипулятора последовательной структуры с тремя управляемыми степенями свободы. Перемещение рабочего органа из известного положения в заданное конечное положение реализуется изменением длин исполнительных звеньев трипода и изменением углов поворота звеньев манипулятора последовательной структуры. В качестве математической модели управляемых движений манипулятора рассматриваются нелинейные уравнения динамики, полученные с помощью уравнений Лагранжа с неопределенными множителями с дополнительными голономными связями. Перемещения манипулятора определяются характером выполняемой технологической операции. В статье решена задача осуществления программных траекторий рабочего органа, заданных в параметрической форме. Сначала определяются законы изменения обобщенных координат манипулятора, удовлетворяющие заданным граничным условиям. С этой целью программные законы перемещения рабочего органа представляются в дискретной форме, и определяется множество точек, характеризующих последовательные положения исполнительных приводов трипода, путем решения оптимизационной задачи о конфигурации манипулятора (позииионная задача) из условия минимума изменения длин исполнительных звеньев в каждой точке траектории рабочего органа. Затем проводится интерполяция этих значений либо конечным набором сплайнов третьего и четвертого порядка, либо для первого и последнего участков траектории сплайнами пятого порядка и методом точечной квадратичной аппроксимации — для промежуточных участков траектории. Методика синтеза динамических алгоритмов стабилизации рабочего органа относительно заданного положения и реализации программных траекторий основана на формировании управляющих сигналов исполнительных приводов путем решения обратной задачи динамики с использованием алгоритма формирования управляющих сигналов из условия, чтобы отклонения от текущих значений программных траекторий были решениями дифференциального уравнения второго порядка. Контуры управления исполнительными двигателями синтезируются в процессе построения алгоритма траекторного управления. Приводятся результаты численного моделирования, подтверждающие работоспособность предложенного алгоритма на примере поступательного перемещения рабочего органа.

**Ключевые слова:** манипулятор параллельно-последовательной структуры (гибридный), программные траектории, алгоритмы синтеза программных управляющих сигналов

#### Введение

Манипуляторы с механизмами параллельнопоследовательной структуры находят все большее применение в различных отраслях промышленности: в машиностроении при механической обработке деталей сложной геометрии [1—3], в приборостроении при измерении отклонений позиционирования [4], при упаковке продукции [5], а также в технологических процессах при производстве и переработке сельскохозяйственной продукции [6]. К наиболее важным задачам при разработке таких манипуляторов относятся

кинематический и динамический анализ, разработка методов синтеза перемещений рабочего органа в пространстве с требованием устойчивости заданных параметров при наличии начальных возмущений, координация движений приводных исполнительных механизмов. На вход системы управления должны поступать управляющие сигналы, формирующие программные законы перемещения исполнительных приводов манипулятора. На выходе — заданные обобщенные координаты и скорости рабочего органа. Необходимо синтезировать оптимальные программные законы управления движением исполнительных приводов, учитывающие характеристики приводных двигателей, их влияние на динамику управляемых механизмов.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Статья подготовлена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-48-340013 р\_а.

#### Постановка задачи

Рассматривается манипулятор параллельнопоследовательной структуры (рис. 1) с семью управляемыми степенями свободы. Жесткость конструкции обеспечивает пирамида, составленная из трех активных звеньев переменной длины AM, BM, CM, а дополнительную маневренность и манипулятивность — исполнительное звено AD и захват последовательной структуры с тремя управляемыми степенями свободы [7] (рис. 2, см. четвертую сторону обложки).

Пространственное положение манипулятора и рабочего органа захвата определяются относительно абсолютной системы координат *Охуг.* С корпусом каждого исполнительного звена захватного устройства (рис. 2) связаны подвижные системы координат  $O_1x_1y_1z_1$ ,  $O_2x_2y_2z_2$ ,  $O_3x_3y_3z_3$ . Ось  $O_iz_i$  каждого звена направлена по оси вращения этого звена относительного предыдущего звена.

Конструкция манипулятора обеспечивает голономные связи между координатами точки  $M[x_M(t), y_M(t), z_M(t)]$  — центра масс сферического шарнира — и длинами исполнительных звеньев [8]:

$$l_{1}(t) = \sqrt{x_{M}^{2} + (y_{M} + |OA|\sin \varphi)^{2} + (z_{M} - |OA|\cos \varphi)^{2}};$$

$$l_{2}(t) = \sqrt{(x_{M} - |OB|)^{2} + y_{M}^{2} + z_{M}^{2}(t)};$$

$$l_{3}(t) = \sqrt{(x_{M} + |OB|)^{2} + y_{M}^{2} + z_{M}^{2}(t)};$$

$$l_{4}(t) = \sqrt{(|OK| - |OA|\sin \varphi)^{2} + (|OA|\cos \varphi + |DK|)^{2}}.$$
(1)

Для реализации технологических процессов при механической обработке, сварке, упаковке и т.п. [1, 3] необходимо перемещать рабочий орган манипулятора по заданной программной траектории, сохраняя заданное пространственное положение рабочего органа. Определение аналитических выражений для законов изменения длин исполнительных цилиндров  $l_{k}(t)$ , (k = 1, ..., 4) и законов изменения углов  $\varphi(t)$ ,  $\alpha(t), \psi(t), \beta(t)$  основывается на дискретизации траектории  $x_E(t)$ ,  $y_E(t)$ ,  $z_E(t)$  характерной точки рабочего органа манипулятора (см. рис. 1) и законов изменения углов  $\alpha(t)$ ,  $\psi(t)$ ,  $\beta(t)$  в моменты времени  $t_i = i\Delta \tau$ , i = 0, 1, 2, 3, ..., n. Множество значений  $l_k(t_i)$ , (k = 1, ..., 4), характеризующих последовательные положения исполнительных приводов, определяется решением оптимизационной задачи о конфигурации манипулятора [9]. Затем проводится интерполяция этих значений



Рис. 1. Расчетная схема манипулятора-трипода на поворотном основании с трехстепенным захватным устройством Fig. 1. The design scheme of the manipulator-tripod on a rotating base with a three-stage gripper

либо конечным набором сплайнов третьего и четвертого порядка [10], либо для первого и последнего участков траектории сплайнами пятого порядка и методом точечной квадратичной аппроксимации — для промежуточных участков траектории [11]. Таким образом, находятся полиномы, выражающие обобщенные координаты как функции времени.

В статье приводится решение задачи синтеза алгоритма управления манипулятора, обеспечивающего перемещение рабочего органа в заданное положение за заданное время по программной траектории. Для решения этой задачи используется математическая модель динамики манипулятора.

#### Полная модель динамики манипулятора

В качестве обобщенных координат принимаются параметры (см. рис. 1)  $q_1 = \varphi$ ,  $q_2 = \gamma$ ,  $q_3 = x_M$ ,  $q_4 = y_M$ ,  $q_5 = z_M$ , которые описывают конфигурацию манипулятора — трипода с поворотным основанием. Координаты (рис. 2, см. четвертую сторону обложки)  $q_6 = \alpha$ ,  $q_7 = \psi$ ,  $q_8 = \beta$  описывают состояние трехзвенного захватного устройства. Угол  $\beta(t)$  не влияет на пространственное положение рабочего органа. Закон его изменения определяется характером технологического процесса.

Конструкция сферического узла, в котором сходятся звенья переменной длины |AM|, |BM|,

|CM|, обеспечивает геометрическую связь между координатами  $q_1, ..., q_4$  (см. рис. 1):

$$f(\gamma, \phi) = \gamma - \operatorname{arctg} \frac{-x_M}{y_M + |OA| \sin \phi} = 0.$$
 (2)

Число независимых обобщенных координат манипулятора равно семи.

В качестве исполнительных звеньев используются приводные механизмы, состоящие из двигателя постоянного тока, необратимого редуктора и шариковинтовой передачи. Статическая характеристика привода с двигателем постоянного тока с независимым возбуждением имеет вид

$$F_k = ru_k - sl_k, \tag{3}$$

где  $F_k$  — усилие на штоке исполнительного звена; r, s — коэффициенты, зависящие от параметров двигателя и механической передачи;  $u_k$  — управляющее напряжение;  $\dot{l}_k$  — скорость штока исполнительного звена.

Характеристики приводов поворота звеньев захватного устройства имеют такую же форму.

Выражение кинетической энергии [12] через обобщенные координаты и скорости имеет вид

$$T = \frac{1}{2} m_A |OA|^2 \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2} (\dot{x}_M^2 + \dot{y}_M^2 + \dot{z}_M^2) (M + m_W) + \frac{1}{2} I_\gamma \dot{\gamma}^2 + \frac{1}{2} I_\alpha \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} I_\psi \dot{\psi}^2 + \frac{1}{2} I_\beta \dot{\beta}^2 + \\ + \sin \psi (\dot{x}_m \sin \gamma - \dot{y}_m \cos \gamma) [m_3 l_{c3} + m_4 l_{c4} + m_W l_{cW}] \dot{\gamma} - \cos \alpha (\dot{x}_m \cos \gamma + \dot{y}_m \sin \gamma) \times \\ \times [m_2 l_{c2} + m_3 (a + l_{c3} \cos \psi) + m_4 (a + l_{c4} \cos \psi) + m_W (a + l_{cW} \cos \psi)] \dot{\gamma} + [m_2 l_{c2} + m_3 (a + l_{c3} \cos \psi) + \\ + m_4 (a + l_{c4} \cos \psi) + m_W (a + l_{cW} \cos \psi)] [\dot{z}_m \cos \alpha + \sin \alpha (\dot{x}_m \sin \gamma - \dot{y}_m \cos \gamma)] \dot{\alpha} + \\ + (m_3 l_{c3} + m_4 l_{c4} + m_W l_{cW}) [\sin \psi \cos \alpha (\dot{x}_m \sin \gamma - \dot{y}_m \cos \gamma) - \cos \psi (\dot{x}_m \cos \gamma + \dot{y}_m \sin \gamma) - \\ - \dot{z}_m \sin \psi \sin \alpha ] \dot{\psi} + m_3 l_{c3} (a + l_{c3} \cos \psi) \sin \alpha \sin \psi \dot{\alpha} \dot{\gamma} + (I_{3x} - I_{3y}) \sin \psi \cos \psi \sin \alpha \dot{\alpha} \dot{\gamma} + \\ + m_4 l_{c4} (a + l_{c4} \cos \psi) \sin \alpha \sin \psi \dot{\alpha} \dot{\gamma} + [(I_{4y} - I_{4x}) \sin \beta \cos \psi \cos \beta \cos \alpha - I_{4z} \sin \psi \sin \alpha] \dot{\gamma} \dot{\alpha} + \\ + m_W l_{cW} (a + l_{cW} \cos \psi) \sin \alpha \sin \psi \dot{\alpha} \dot{\gamma} + [(I_{Wy} - I_{Wx}) \sin \beta \cos \psi \cos \beta \cos \alpha - I_{Wz} \sin \psi \sin \alpha] \dot{\gamma} \dot{\alpha} + \\ + (a + l_{c4} \cos \psi) \cos \psi ] \dot{\gamma} \psi + (I_{4x} \cos^2 \beta + I_{4y} \sin^2 \beta) \cos \alpha \dot{\psi} \dot{\gamma} + m_W l_{cW} \cos \alpha [l_{cW} \sin^2 \psi + \\ + (a + l_{cW} \cos \psi) \cos \psi ] \dot{\gamma} \dot{\psi} + (I_{Wx} \cos^2 \beta + I_{4y} \sin^2 \beta) \cos \alpha \dot{\psi} \dot{\gamma} + (I_{4y} - I_{4x}) \sin \beta \cos \beta \cos \psi \dot{\alpha} \dot{\psi} + \\ + (I_{Wy} - I_{Wy}) \sin \beta \cos \beta \cos \psi \dot{\alpha} \dot{\psi} + I_{4z} (\sin \alpha \dot{\gamma} - \sin \psi \dot{\alpha}) \dot{\beta},$$

где  $m_A$  — приведенная масса поворотного основания ABC;  $m_1$  — масса пятиподвижного сферического шарнирного узла;  $m_2$ ,  $m_3$ ,  $m_4$  — массы звеньев захвата ME;  $m_W$  — масса переносимого груза;  $M = m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ,  $m_4$  — приведенная масса манипулятора;  $l_{c3}$ ,  $l_{c4}$ ,  $l_{cW}$  — расстояния до центров масс звеньев захвата ME и груза;  $I_{4y}$ ,  $I_{4x}$ ,  $I_{Wy}$ ,  $I_{Wx}$  — приведенные к осям относительного вращения моменты инерции звеньев 3 и 4 захвата ME и переносимого груза относительно собственных координатных осей.

Приведенные моменты инерции можно записать в виде

$$I_{\alpha} = I_{2z} + m_2 l_{c2}^2 + m_3 (a + l_{c3} \cos \psi)^2 + + m_4 (a + l_{c4} \cos \psi)^2 + m_W (a + l_W \cos \psi)^2 + + (I_{3y} + I_{4z} + I_{Wz}) \sin^2 \psi + [I_{3x} + (I_{4x} + I_{Wx}) \sin^2 \beta + + (I_{4y} + I_{Wy}) \cos^2 \beta] \cos^2 \psi;$$

$$I_{\beta} = I_{4z} + I_{Wz} = \text{const};$$

$$I_{\gamma} = (m_3 l_{c3}^2 + m_4 l_{c4}^2 + m_W l_{cW}^2) \sin^2 \psi + I_{1z} + (I_{2x} + I_{3x} \sin^2 \psi + I_{3y} \cos^2 \psi + I_{4z} + I_{Wz}) \sin^2 \alpha + [I_{2y} + I_{3z} + m_2 l_{c2}^2 + m_3 (a + l_{c3} \cos \psi)^2 + m_4 (a + l_{c4} \cos \psi)^2 + m_W (a + l_{cW} \cos \psi)^2 + (I_{4x} + I_{Wx}) \cos^2 \beta + (I_{4y} + I_{Wy}) \sin^2 \beta] \cos^2 \alpha;$$

$$I_{\psi} = I_{3z} + m_3 l_{3c}^2 + m_4 l_{4c}^2 + m_W l_{cW}^2 + (I_{4x} + I_{Wx}) \cos^2 \beta + (I_{4x} + I_{Wy}) \sin^2 \beta.$$
(5)

Потенциальная энергия [12] находится по формуле

$$\Pi(q_k) = m_A g |OA| \cos \varphi + (M + m_W) g z_M + + [m_2 l_{c2} + (m_3 + m_4 + m_W) a + + (m_3 l_{c3} + m_4 l_{c4} + m_W l_{cW}) \cos \psi] g \sin \alpha.$$
(6)

Смысл геометрических параметров, входящих в выражения (3)—(5) ясен из рис. 1 и рис. 2 (см. четвертую сторону обложки).

Для описания динамики манипулятора воспользуемся уравнениями Лагранжа с неопределенными множителями с дополнительными голономными связями [13, 14]:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} = Q_j - \frac{\partial \Pi}{\partial q_j} + \lambda \frac{\partial f}{\partial q_j}, \qquad (7)$$
  
$$j = 1, \dots, 8,$$

где T — кинетическая энергия манипулятора;  $Q_j$  — обобщенная сила, соответствующая *j*-й координате;  $\lambda$  — множители Лагранжа;  $-\partial \Pi / \partial q_j$  — обобщенная сила потенциальных сил, соответствующая *j*-й координате.

Воспользовавшись формализмом (7) и уравнением голономной связи (2), получаем восемь дифференциальных уравнений, описывающих динамику манипулятора.

• По координате  $q_1 = \varphi$ :

$$|OA|^2 m_A \ddot{\varphi} = Q_{\varphi} + \lambda \frac{\partial f}{\partial \varphi} + m_A g |OA| \sin \varphi,$$

обобщенная сила  $Q_{\varphi}$  и частная производная  $\frac{\partial f}{\partial \varphi}$  определяются выражениями

$$\begin{aligned} Q_{\varphi} &= F_1 \frac{(y_M \cos \varphi + z_M \sin \varphi) |OA|}{l_1} + \\ &+ F_4 \frac{\left( |DK| \sin \varphi - |OK| \cos \varphi \right) |OA|}{l_4}, \\ &\frac{\partial f}{\partial \varphi} = \frac{-x_M |OA| \cos \varphi}{x_M^2 + (y_M + |OA| \sin \varphi)^2}. \end{aligned}$$

Тогда уравнение (4) принимает форму

$$\ddot{\varphi} = F_1 \frac{y_M \cos \varphi + z_M \sin \varphi}{|OA| m_A l_1} + F_4 \frac{|DK| \sin \varphi - |OK| \cos \varphi}{|OA| m_A l_4} -$$
(8)

$$-\lambda \frac{x_M \cos \varphi}{\left|OA\right| m_A [x_M^2 + (y_M + \left|OA\right| \sin \varphi)^2]} + \frac{g}{\left|OA\right|} \sin \varphi;$$

• *п*о координате  $q_2 = \gamma$ 

$$E_2(T) = \lambda; \tag{9}$$

• по координатам  $q_3 = x_M$ ,  $q_4 = y_M$ ,  $q_5 = z_M$ , уравнения имеют вид

$$E_{3}(T) = F_{1}\frac{x_{M}}{l_{1}} + F_{2}\frac{x_{M} - |OB|}{l_{2}} + F_{3}\frac{x_{M} + |OB|}{l_{3}} + \lambda \frac{y_{M} + |OA|\sin\phi}{x_{M}^{2} + (y_{M} + |OA|\sin\phi)^{2}},$$
(10)

$$E_{4}(T) = F_{1} \frac{y_{M} + |OA| \sin \phi}{l_{1}} + F_{2} \frac{y_{M}}{l_{2}} +$$

$$+ F_{3} \frac{y_{M}}{l_{3}} - \lambda \frac{x_{M}}{x_{M}^{2} + (y_{M} + |OA| \sin \phi)^{2}},$$

$$E_{5}(T) = F_{1} \frac{z_{M} - |OA| \cos \phi}{l_{1}} +$$

$$+ F_{2} \frac{z_{M}}{l_{2}} + F_{3} \frac{z_{M}}{l_{3}} - (M + m_{W})g;$$
(11)
(12)

• по координатам  $q_6 = \alpha, q_7 = \psi, q_8 = \beta$ :

$$E_{6}(T) = T_{\alpha} - (m_{3}l_{c3} + m_{4}l_{c4} + m_{W}l_{cW})g\cos\psi\cos\alpha; \qquad (13)$$

$$E_{7}(T) = T_{4} + (13)$$

+ 
$$(m_3 l_{c3} + m_4 l_{c4} + m_W l_{cW})g\sin\psi\sin\alpha;$$
 (14)

 $I_{\beta}(\ddot{\beta}+\ddot{\gamma}\sin\alpha-\ddot{\alpha}\sin\psi+\dot{\alpha}\dot{\gamma}\cos\alpha-\dot{\alpha}\dot{\psi}\cos\psi)-$ 

$$I_4(\dot{\alpha}\dot{\gamma}\cos\alpha\cos\psi\cos2\beta + (15))$$

$$+ \dot{\alpha} \dot{\psi} \cos \psi \cos 2\beta + \dot{\psi} \dot{\gamma} \cos \alpha \sin 2\beta) = T_{\beta};$$

$$I_4 = (I_{4y} + I_{Wy} - I_{4x} - I_{Wx}).$$

В соотношениях (8)—(15)  $E_s(T)$  — это эйлеров оператор над функцией T:

$$E_s(T) = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_s}.$$

Полученные уравнения (8)—(15) совместно с уравнением связи (2) могут использоваться для определения динамических ошибок при выполнении программных перемещений  $x_M^{pr}(t), y_M^{pr}(t), z_M^{pr}(t)$  рабочего органа [15]. Решение этой задачи связано с интегрированием дифференциальных уравнений [16]. Однако из-за инерционности механизмов редуктора и шариковинтовой пары исполнительных звеньев фактическая траектория  $x_M(t)$ ,  $y_M(t)$ ,  $z_M(t)$ может отличаться от заданной. Если известны законы перемещения захвата манипулятора, необходимые для выполнения технологического процесса, можно найти движущие силы  $F_k(t), k = 1, ..., 4,$  и моменты  $T_{\psi}(t), T_{\alpha}(t), T_{\beta}(t),$ обеспечивающие выполнение программного движения, а также значения динамических нагрузок в кинематических парах [17].

Результаты расчетов служат для выбора приводных электродвигателей, проведения прочностных расчетов элементов конструкции манипулятора, а также являются исходными данными для проектирования системы управления.

#### Динамический алгоритм системы управления перемещением рабочего органа по программным траекториям

Формирование управляющих усилий исполнительных приводов манипулятора-трипода осуществляется методом решения обратной задачи динамики с использованием алгоритма управления по ускорению [18]. Контуры управления исполнительными двигателями синтезируются в процессе построения алгоритма траекторного управления. Синтез алгоритма стабилизации программных перемещений захвата, заданных в параметрической форме, осуществляется по назначенной траектории, с использованием сигналов датчиков обратной связи.

Принимаем, что программная траектория точки крепления захвата манипулятора задана в параметрической форме  $x_M^{pr}(t), y_M^{pr}(t), z_M^{pr}(t)$ . Эти функции дважды дифференцируемы по времени и удовлетворяют граничным условиям

$$\begin{aligned} x_{M}^{pr}(0) &= x_{M0}, \ y_{M}^{pr}(0) &= y_{M0}, \ z_{M}^{pr}(0) &= z_{M0}, \\ \dot{x}_{M}^{pr}(0) &= \ddot{x}_{M}^{pr}(0) &= \dot{x}_{M}^{pr}(\tau) &= \ddot{x}_{M}^{pr}(\tau) = 0, \\ \dot{y}_{M}^{pr}(0) &= \ddot{y}_{M}^{pr}(0) &= \dot{y}_{M}^{pr}(\tau) &= \ddot{y}_{M}^{pr}(\tau) = 0, \\ \dot{z}_{M}^{pr}(0) &= \ddot{z}_{M}^{pr}(0) &= \dot{z}_{M}^{pr}(\tau) &= \ddot{z}_{M}^{pr}(\tau) = 0, \end{aligned}$$
(16)

где т — время перемещения захвата по траектории.

Аналитические выражения в виде полиномов для программных законов изменения длин  $l_1^{pr}(t), l_2^{pr}(t), l_3^{pr}(t), l_4^{pr}(t)$  исполнительных звеньев, углов поворота звеньев захватного устройства  $\alpha^{pr}(t), \psi^{pr}(t), \varphi^{pr}(t)$  и конструктивный угол  $\gamma^{pr}(t)$  определяются методами, изложенными в работах [10, 11]. Подставляя эти выражения в уравнения математической модели динамики манипулятора (8)—(15), получаем уравнения, из которых находятся законы изменения программных управляющих усилий и моментов  $T_{\psi}(t)$ ,  $T_{\alpha}(t)$ ,  $T_{\beta}(t)$ . Алгоритм формирования управляющих сигналов исполнительных приводов манипулятора-трипода и моментов находим из условия, что отклонения  $\Delta q_i(t) = q_i^{pr}(t) - q_i(t)$  текущих значений обобщенных координат  $q_1 = \varphi$ ,  $q_3 = x_M$ ,  $q_4 = y_M$ ,  $q_5 = z_M, q_6 = \alpha, q_7 = \psi, q_8 = \beta$  от программных соответствуют решению дифференциального уравнения второго порядка

$$\Delta \ddot{q}_{i}(t) + b_{1i} \Delta \dot{q}_{i}(t) + b_{2i} \Delta q_{i}(t) = 0, \qquad (17)$$

где  $b_{1j}$ ,  $b_{2j}$  — постоянные положительные коэффициенты, определяющие характер переходного процесса.

Процесс (17) будет реализован в том случае, когда ускорения  $\ddot{q}_j(t)$  изменения длин исполнительных звеньев определяются выражениями

$$\ddot{q}_{j}(t) = \ddot{q}_{j}^{pr}(t) + b_{1j}\Delta\dot{q}_{j}(t) + b_{2j}\Delta q_{j}(t).$$
(18)

Параметры этих уравнений позволяют изменять динамические характеристики управляемых перемещений захвата манипулятора. После подстановки выражения (18) в соотношения (8)—(15) находятся искомые законы изменения управляющих усилий, а управляющие напряжения находятся из уравнения (3).

Устойчивость алгоритма обеспечивается выбором коэффициентов  $b_{j1}$ ,  $b_{j2}$  уравнения (18). Действительно, после подстановки управляющих усилий в соотношения (8)—(15), получаем дифференциальные уравнения кинематической траектории движения замкнутой системы

$$K_{j}\ddot{q}_{j}(t) + b_{1j}\dot{q}_{j}(t) + b_{2j}q_{j}(t) = K_{j}\ddot{q}_{j}^{pr}(t) + b_{1j}\dot{q}_{j}^{pr}(t) + b_{2j}q_{j}^{pr}(t),$$
(19)

где  $K_1 = m_A |OA|^2$ ,  $K_j = M + m_W$ , j = 3, ..., 5,  $K_6 = I_\alpha$ ,  $K_7 = I_\psi$ ,  $K_8 = I_\beta$ .

Общими решениями (18) являются функции

$$q_{j}(t) = q_{j}^{pr}(t) + C_{1j} \mathbf{e}^{\beta_{1}t} + C_{2j} \mathbf{e}^{\beta_{2}t}, \qquad (20)$$

где  $C_{1j}$ ,  $C_{2j}$  — постоянные, определяемые начальными условиями;  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  — корни характеристического уравнения (19).

Так как  $b_{1j} > 0$ ,  $b_{2j} > 0$ , то действительная часть корней  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  всегда отрицательная, поэтому  $q_j(t) \rightarrow q_j^{pr}(t)$  при  $t \rightarrow \infty$ . Методика выбора оптимальных значений этих коэффициентов изложена в работе [18].

Алгоритмы формирования управляющих напряжений, поступающих на входы электродвигателей исполнительных приводов манипулятора, находим с учетом статической характеристики электроприводов (3)

На рис. 3 приведена структурная схема системы управления, соответствующая сформулированному алгоритму управления исполнительными звеньями.

На рис. 3  $\mathbf{q}(t) = [\phi, x_M, y_M, z_M, \alpha, \psi, \beta]$  — вектор обобщенных координат манипулятора.



Рис. 3. Функциональная схема системы управления Fig. 3. Functional capture of the control system

В блоке 1 осуществляется кинематический синтез программных законов изменения обобшенных координат манипулятора, в блоке 2 решение уравнений системы (8)—(15), в блоке 3 определяются законы изменения программных управляющих усилий  $F_k^{pr}$  и моментов  $T_{\Psi}^{pr}, T_{\alpha}^{pr}, T_{\beta}^{pr}$ , в блоке 4 — законы изменения программных управляющих напряжений  $u_k^{pr}$ . Обратные связи в контурах управления приводными двигателями осуществляются по переменным  $q_j(t), \dot{q}_j(t)$ . Значения этих переменных используются при вычислении выражений управляющих напряжений, а также при вычислении отклонений по положению  $\Delta q_j(t)$ , скорости  $\Delta \dot{q}_i(t)$  и ускорению  $\Delta \ddot{q}_i(t)$ .

Изложенная методика требует большого объема вычислений, поэтому ее рационально можно использовать для частных видов движения манипулятора. Анализ технологических процессов показывает, что большинство операций может быть выполнено манипулятором с помощью конечного вида перемещений рабочего органа [19], для которых необходимо заранее сформировать базу математических моделей манипулятора и синтезировать системы управления. Частные виды перемещений звеньев манипулятора алгоритмизируются с помощью выражений кинетической и потенциальной энергий (4)—(6) заданием значений переменных  $q_1 = \varphi$ ,  $q_2 = \gamma$ ,  $q_3 = x_M$ ,  $q_4 = y_M$ ,  $q_5 = z_M, q_6 = \alpha, q_7 = \psi, q_8 = \beta$ , которые описывают конфигурацию манипулятора-трипода с поворотным основанием и состояние трехзвенного захватного устройства.

### Пример формирования базы моделей и управлений

**Кинематический синтез.** В качестве примера реализации предложенных методов расчета программных перемещений исполнительных звеньев рассмотрим горизонтальное поступательное прямолинейное движение манипулятора последовательной структуры с тремя управляемыми степенями свободы  $x_E = x_M = \text{const}, z_E = z_M = \text{const}, y_E(t) = y_M(t)$  из начальной точки с координатами  $y_E(0) = 1100$  мм в конечную точку, с координатами  $x_E(0) = x_E(\tau) = 200$  мм,  $z_E(0) = z_E(\tau) = 190$  мм,  $y_E(\tau) = 1600$  мм за время  $\tau = 12$  с. Принимаем закон движения вдоль оси Oy [20] в виде

$$y_E(t) = y_E(0) + (10 - 15t/\tau + 6t^2/\tau^2) \times \times \frac{t^3}{\tau^3} (y_E(\tau) - y_E(0)), \tau \ge t \ge 0.$$
(21)

Уравнение движения (21) удовлетворяет граничным условиям (16). Пространственное положение рабочего органа задаем направляющими косинусами  $\alpha_{23} = 0$ ,  $\alpha_{33} = -1$ ,  $\alpha_{13} = 0$  подвижной системы координат  $O_4 x_4 y_4 z_4$  рабочего органа относительно неподвижной системы координат Oxyz (см. рис. 2 на четвертой стороне обложки). В этом случае обобщенные координаты захватного устройства равны  $\alpha = -\frac{\pi}{2}$ ,  $\beta = 0$ ,  $\psi(t) = -\gamma(t)$ .

Кинематический синтез законов перемещения исполнительных звеньев проводим интерполяцией первого и последнего участков траектории сплайнами пятого порядка и методом точечной квадратичной аппроксимации промежуточных участков траектории [11]. Этот метод позволяет удовлетворить граничным условиям (16) и условиям непрерывности [21] на промежуточных участках траектории. Выбор числа узловых точек зависит от вида программного перемещения захвата. В рассматриваемом примере разбиваем интервал времени  $\tau$  перемещения захвата на двенадцать равных частей. Находим координаты  $x_E(t_i), y_E(t_i), z_E(t_i)$  узловых точек (21) в моменты времени  $t_i = i\tau/12, i = 0,$ 1, 2, 3, ..., 12:

$$x_E(t_i) = x_E(0) = 200 \text{ MM},$$
  
 $y_E(t_i) = y(t_i), \ z_E(t_i) = z_E(0) = 190 \text{ MM}.$  (22)

Определяем [5, 6] конфигурацию манипулятора в начальный момент времени  $l_k(0) = l_{k0}$ , (k = 1, ..., 4),  $\alpha(0) = 0$ ,  $\psi(0) = \psi_0 = -\gamma_0$ . Затем находим конфигурацию манипулятора в каждый момент времени  $t_i$ . Таким образом, в моменты времени  $t_i$  известны длины исполнительных цилиндров  $l_k(t_i)$ , (k = 1, ..., 4). Полученные значения используется для вычисления аппроксимирующих и интерполирующих полиномов, определяющих законы перемещения исполнительных приводов манипулятора. В результате расчетов по методике, изложенной в работе [11], получены функции  $l_k^{pr}(t)$ :

$$\begin{split} & l_1^{pr}(t) = \\ & = \begin{cases} P_1(t) = -37,87t^5 + 87,23t^4 - 49,49t^3, \\ 1 \ge t \ge 0, \\ Q_1(t) = 0,013t^5 - 0,384t^4 + 3,67t^3 - \\ -12,64t^2 + 26,82t + 1268,95,11 \ge t \ge 1, \\ H_1(t) = -46,64t^5 + 2691,51t^4 - 62085,95t^3 + \\ + 71642,34t^2 - 4,12t + 9,49, \ 12 \ge t \ge 11; \end{cases} \end{split}$$

$$I_2^{pr}(t) =$$

$$= \begin{cases} P_2(t) = -18,156t^5 + 41,40t^4 - 21,42t^3, \\ 1 \ge t \ge 0, \\ Q_2(t) = 0,015t^5 - 0,463t^4 + 4,136t^3 - \\ -7,208t^2 + 14,341t + 1209,208,11 \ge t \ge 1, \\ H_2(t) = -15,28t^5 + 882,04t^4 - 20349,27t^3 + \\ + 234567,65t^2 - 1,35t + 3,11, 12 \ge t \ge 11. \end{cases}$$

$$l_{3}^{pr}(t) =$$

$$= \begin{cases}
P_{3}(t) = -25, 22t^{5} + 57, 64t^{4} - 30, 96t^{3}, \\
1 \ge t \ge 0, \\
Q_{3}(t) = 0, 02t^{5} - 0, 49t^{4} + 4, 53t^{3} - \\
-10, 11t^{2} + 20, 06t + 1317, 122, 11 \ge t \ge 1, \\
H_{3}(t) = -20, 34t^{5} + 1173, 95t^{4} - 27081, 68t^{3} + \\
+ 312156, 61t^{2} - 1, 80t + 4, 14, 12 \ge t \ge 11;
\end{cases}$$
(23)

$$l_{4}^{pr}(t) = \\ \begin{cases} P_{4}(t) = -21,55t^{5} + 49,47t^{4} - 27,33t^{3}, \\ 1 \ge t \ge 0, \\ Q_{4}(t) = 0,011t^{5} - 0,33t^{4} + 3,02t^{3} - \\ -7,83t^{2} + 16,03t + 973,54,11 \ge t \ge 1, \\ H_{4}(t) = -24,98t^{5} + 1441,63t^{4} - 33256,53t^{3} + \\ + 383350,63t^{2} - 2,21t + 5,09,12 \ge t \ge 11. \end{cases}$$

Для оценки точности отслеживания приводами манипулятора заданных программных перемещений захвата манипулятора строятся траектория и закон перемещения характерной точки  $E[x_E(t), y_E(t), z_E(t)]$  рабочего органа манипулятора (см. рис. 1) по сформированным законам изменения длин исполнительных цилиндров (23). С этой целью, решая прямую задачу о положениях, определяем координаты точки  $M(x_M, y_M, z_M)$  через обобщенные координаты манипулятора  $l_k(t)$  (k = 1, ..., 4), затем находим [12] законы изменения координат точки  $E[x_E(t), y_E(t), z_E(t)]$ .

На рис. 4, 5 (см. четвертую сторону обложки) приведены зависимости (23) длин  $l_k^{pr}(t)$  и скоростей  $\dot{l}_k^{pr}(t)$  исполнительных звеньев от времени, которые находятся как первые производные от функций  $l_k^{pr}(t)$ .

Динамический синтез. Уравнения динамики манипуляционной системы в конкретном случае перемещения рабочего органа получаем из соотношений (8)—(15) с учетом  $x_M = \text{const}, y_M(t), z_M = \text{const}, \alpha = -\pi/2, \beta = 0, \psi(t) = -\gamma(t),$ 

$$|OA|m_A\ddot{\varphi} = F_1 \frac{y_M \cos\varphi + z_M \sin\varphi}{l_1} - F_4 \frac{|DK|\sin\varphi + |OK|\cos\varphi}{l_4} -$$
(24)

$$-\lambda \frac{x_M \cos \varphi}{x_M^2 + (y_M + |OA| \sin \varphi)^2} + m_A g \sin \varphi;$$

$$0 = F_{1} \frac{x_{M}}{l_{1}} + F_{2} \frac{x_{M} - |OB|}{l_{2}} + F_{3} \frac{x_{M} + |OB|}{l_{3}} + \lambda \frac{y_{M} + |OA|\sin\varphi}{x_{M}^{2} + (y_{M} + |OA|\sin\varphi)^{2}};$$

$$(25)$$

$$\frac{y_{M}(M + m_{W}) + (\ddot{\psi}\sin 2\psi + 2\dot{\psi}^{2}\cos 2\psi) \times (m_{3}l_{c3} + m_{4}l_{c4} + m_{W}l_{cW}) = F_{1} \frac{y_{M} + |OA|\sin\varphi}{l_{1}} + F_{2} \frac{y_{M}}{l_{2}} + F_{3} \frac{y_{M}}{l_{3}} - \lambda \frac{x_{M}}{x_{M}^{2} + (y_{M} + |OA|\sin\varphi)^{2}};$$

$$(26)$$

$$+ F_{3} \frac{y_{M}}{l_{3}} - \lambda \frac{x_{M}}{x_{M}^{2} + (y_{M} + |OA|\sin\varphi)^{2}};$$

$$(26)$$

$$0 = F_1 \frac{z_M}{l_1} + F_2 \frac{z_M}{l_2} + F_3 \frac{z_M}{l_3} - g(M + m_W);$$

$$T_{\alpha} = -\ddot{y}_M \cos\gamma [m_2 l_{c2} + m_3 (a + l_{c3} \cos \psi) + (27)]$$

$$+ m_{4} (a + l_{c4} \cos \psi) + m_{W} (a + l_{cW} \cos \psi)] - - \dot{\psi}^{2} [m_{3} l_{c3} (l_{c3} \sin^{2} \psi + \cos \psi (a + l_{c3} \cos \psi)) + + m_{4} l_{c4} (l_{c4} \sin^{2} \psi + \cos \psi (a + l_{c4} \cos \psi)) + + m_{W} l_{cW} (l_{cW} \sin^{2} \psi + \cos \psi (a + l_{cW} \cos \psi)) + + I_{4x} + I_{3z} + I_{Wx}];$$
(28)

$$\frac{1}{2}\dot{\psi}^{2}\sin 2\psi(m_{3}l_{c3}^{2}+m_{4}l_{c4}^{2}+m_{W}l_{cW}^{2}+I_{3x}+I_{3y})++\ddot{\psi}[I_{\psi}+I_{\gamma}]+(\ddot{y}_{M}\sin 2\psi+g\sin\psi)\times\times(m_{3}l_{c3}+m_{4}l_{c4}+m_{W}l_{cW})=T_{\psi};$$
(29)

$$I_{\beta}\ddot{\gamma}\sin\alpha = T_{\beta}.$$
 (30)

Управляющие усилия  $F_k^{pr}(t)$ , моменты  $T_{\alpha}^{pr}(t), T_{\psi}^{pr}(t), T_{\beta}^{pr}(t)$  и напряжения  $u_k^{pr}(t)$ , реализующие законы движения по программной траектории, находятся из уравнений (24)—(30) после подстановки выражений (18) для текущих значений ускорений. На рис. 6, 7 (см. четвертую сторону обложки) приведены законы изменения управляющих усилий и управляющих напряжений электродвигателей линейных исполнительных звеньях манипулятора-трипода. Расчеты проводили для следующих значений параметров актуаторов (максимальная допустимая скорость 60 мм/с, ход штока 610 мм) манипулятора и траектории: M = 5,5 кг,  $m_{rp} = 2$  кг).

#### Заключение

В статье предлагается алгоритм синтеза управляющих напряжений, основанный на

решении обратной задачи динамики манипулятора, описываемой нелинейными дифференциальными уравнениями. Алгоритм формирования управляющих напряжений формируется с учетом кинематических параметров манипулятора по всем степеням свободы. Математическое моделирование показало, что предложенный алгоритм позволяет реализовать перемещение захвата по программной траектории с ошибкой не более 1 %. Алгоритм хорошо функционирует и при наличии начальных возмущений. Форма уравнений, характеризующих характер изменения отклонений, позволяет изменять динамические характеристики управляемых перемещений манипулятора. Приведенный алгоритм вычисления управляющих усилий относится к числу алгоритмов компенсирующего типа. Для повышения точности определения управляющих усилий необходимо математическую модель манипулятора дополнить динамической моделью динамики редуктора и шариковинтовой пары. Представленный алгоритм реализован в виде программы вычисления управляющих напряжений с помощью аппарата символьной математики MathCAD.

#### Список литературы

1. Афонин В. Л., Подзоров П. В., Слепцов В. В. Обрабатывающее оборудование на основе механизмов параллельной кинематики. Москва: Машиностроение, 2006.

2. **Бушуев В. В., Хольшев И. Г.** Механизмы параллельной структуры в машиностроении // СТИН. 2001. № 1. С. 3—8.

3. Liu N., Wu J. Kinematics and application of a hybrid industrial robot Delta-RST. Sens. Transducers 169(4), 2014. P. 186–192.

4. Серков Н. А. Точность многокоординатных машин с ЧПУ: Теоретические и экспериментальные основы. Москва: ЛЕНАНД, 2015.

5. **Робот-манипулятор** FlexPicker IRB 360 компании AAB www.abb.com/robotics. URL: http://www.roboticturnkeyso-lutions.com/robots/abb/datasheet/IRB\_360.pdf.

6. Шипилевский Г. Б., Викторов А. И. Автоматизация мобильных сельскохозяйственных агрегатов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2001. № 3. С. 28—29

7. Жога В. В., Дяшкин-Титов В. В., Дяшкин А. В., Воробьева Н. С., Несмиянов И. А., Иванов А. Г. Манипулятор-трипод параллельно-последовательной структуры: пат. 2616493 Российская Федерация, МПК В66С 23/44. Опубл. 17.04.2017. Бюл. № 11.

8. Герасун В. М., Жога В. В., Несмиянов И. А., Воробьева Н. С., Дяшкин-Титов В. В. Определение зоны обслуживания мобильного манипулятора-трипода// Машиностроение и инженерное образование. 2013. № 3. С. 2—8.

9. Жога, В. В., Дяшкин-Титов В. В., Несмиянов И. А., Воробьева Н. С. Задача позиционирования манипулятора параллельно-последовательной структуры с управляемым захватным устройством// Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 8. С. 525—530.

10. Воробьева Н. С., Жога В. В., Несмиянов И. А. Отслеживание приводами манипулятора параллельно-последовательной структуры программных перемещений рабочего органа // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2019. № 2. С. 154—165.

11. **Vorob'eva N. S. Zhoga V. V., Nesmiyanov I. A., Dyashkin A. V.** Kinematic Synthesis of Programmed Motions of Drivers of a Manipulator-Tripod with a Three-Degree Gripper // Springer Nature Switzerland AG 2019 A. N. Evgrafov (ed.), Advances in Mechanical Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-11981-2

12. Воробьева Н. С., Дяшкин-Титов В. В., Жога В. В., Несмиянов И. А. Динамика манипулятора параллельно- последовательной структуры на основе трипода // Машиностроение и инженерное образование. 2017. № 3. С. 32—41.

13. Лурье А. И. Аналитическая механика. Москва: Наука, Физматлит., 1961. 824 с.

14. Jan Brinker, Burkhard Corves. Lagrangian Based Dynamic Analyses of Delta Robots with Serial-Parallel Architecture ROMANSY 21 // Robot Design, Dynamics and Control. 2016. Vol. 569. P. 133–141. 15. **Staicu S.** Dynamics modelling of a Stewart-based hybrid parallel robot // Adv. Robot. 2015. 29(14). P. 929–938.

16. **Ibrahim O., Khalil W.** Inverse and direct dynamic models of hybrid robots // Mech. Mach. Theory. 2010. 45(4). P. 627–640

17. Abhishek, S. Bellary, Monika Keerthana, M. Srinivasan, V. S. Varun, A. Dash, Anjan Kumar. Modelling and Workspace Analysis of Parallel-Serial Hybrid Manipulator // Applied Mechanics and Materials. 2015. P. 1028–1031.

18. **Крутько П. Д.** Обратные задачи динамики управляемых систем: нелинейные модели. Москва: Наука. Физматлит, 1988. 328 с.

19. Воробьева Н.С, Жога В. В., Дяшкин-Титов В. В., Дяшкин А. В. Разработка базы моделей манипулятора параллельно-последовательной структуры// Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. № 9. С. 143—152.

20. Коловский М. З., Слоущ А. В. Основы динамики промышленных роботов. Москва: Наука. Физматлит, 1998. 240 с.

21. Пол Р. Моделирование, планирование траекторий и управление движением робота-манипулятора / Пер. с англ. М.: Наука. Физматлит, 1976. 104 с.

### Dynamic Synthesis of Parallel-Sequential Structure Manipulator Control Algorithms

N. S. Vorob'eva, vgsxa@mail.ru,

Volgograd State Agrarian University, Volgograd, 400002, Russian Federation,

V. V. Zhoga, viczhoga@gmail.com, L. V. Zhoga, levjog@mail.ru,

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

Center for Technologies in Robotics and Mechatronics Components, Innopolis University, Innopolis, Tatarstan

Corresponding author: Vorob'eva Natalia Serg., Ph.D., Associate Professor, Head of Department, Volgograd State Agrarian University, Volgograd, 400002, Russian Federation, e-mail: vgsxa@mail.ru

Accepted on April 14, 2020

#### Abstract

The paper is devoted to the development of an algorithm for the dynamic synthesis of control signals of actuators ensuring the required paths and application of motion laws of the manipulator's effector. A parallel-sequential structure (hybrid) manipulator has been considered, which consists of a manipulator-tripod on a rotary base and a sequential structure manipulator with three controlled degrees of freedom. The effector moves from a known position to a given final one by changing the lengths of the tripod executive links and the rotation angles of the sequential structure manipulator links. Nonlinear dynamic equations obtained using the Lagrange equations with undetermined multipliers and additional holonomic constraints have been considered as a mathematical model of the controlled manipulator motions. The manipulator motions are determined by the nature of the process operation performed. In the paper, the issue of implementing the program effector paths predetermined in a parametric form has been resolved. First, the manipulator joint trajectories satisfying the given boundary conditions are determined. To do this, the effector motion laws are presented in a discrete form, and a point set characterizing the successive positions of the tripod actuators is determined by solving the optimization problem for the manipulator configuration (positional problem) providing minimum changes in the executive link lengths at each point of the effector path. Then, these values are interpolated by either a finite set of third and fourth-order splines or interpolation of the first and last path sections by fifth-order splines and the technique of point-based quadratic approximation of the intermediate path sections. The technique for the synthesis of dynamic algorithms for stabilizing the effector relative to a given position and implementing the program paths is based on generating the control signals of actuators by solving the inverse dynamic problem using a control signal generation algorithm provided that deviations from the current program path values are the solutions of a second-order differential equation. The actuator control circuits are synthesized when building the trajectory control algorithm. The numerical simulation results have been given that confirm the operability of the algorithm proposed on an example of the effector translation.

**Keywords:** parallel-sequential structure (hybrid) manipulator, program paths, program control signal synthesis algorithms

Acknowledgements: This article was prepared with the financial support of Russian Foundation for Basic Research (grant no. 19-48-340013 p\_a.). *For citation*:

Vorob'eva N. S., Zhoga V. V., Zhoga L. V. Dynamic Synthesis of Parallel-Sequential Structure Manipulator Control Algorithms, *Me-khatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 12, pp. 706–715.

DOI: 10.17587/mau.21.706-715

1. Afonin V. L., Podzorov P. V., Sleptsov V. V. Processing equipment based on parallel kinematics mechanisms. Moscow, Mashinostroenie, 2006 (in Russian).

2. Bushuev V. V., Hol'shev I. G. The mechanisms of parallel structure in mechanical engineering. STIN, 2001, no. 1, pp. 3-8 (in Russian).

3. Liu N., Wu J. Kinematics and application of a hybrid industrial robot Delta-RST. Sens. Transducers 169(4), 2014, pp. 186-192.

4. Serkov N. A. Precision of multi-axis CNC machines): Teoreticheskie i eksperimental'nye osnovy, Moscow, LENAND, 2015 (in Russian).

5. Robot-manipulyator FlexPicker IRB 360 company AAB www.abb.com/robotics, avaiable at: http://www.roboticturnkeysolutions.com/robots/abb/datasheet/IRB 360.pdf.

6. Shipilevskiy G. B., Viktorov A. I. Automation of mobile agricultural units, Mekhanizatsiya i Elektrifikatsiya Sel'skogo Khozvaystva, no. 3, 2001, pp. 28-29 (in Russian).

7. Zhoga V. V., Djashkin-Titov V. V., Djashkin A. V., Vorob'eva N. S., Nesmiyanov I. A., Ivanov A. G. Manipulatortripod of parallel-sequential structure: pat. 2616493 Russian Federation, MPK B66C 23/44. Publ. 17.04.2017. Bul. No. 11 (in Russian).

8. Gerasun V. M., Zhoga V. V., Nesmiyanov I. A., Vorob'eva N. S., Dyashkin-Titov V. V. Determining the service area of a mobile manipulator-tripod, Mashinostroenie i Inzhenernoe Obrazovanie, 2013, no 3. pp. 2-8 (in Russian).

9. Zhoga, V. V., Dyashkin-Titov V. V., Nesmiyanov I. A., Vorob'eva N. S. The task of positioning the manipulator of a parallel-sequential structure with a controlled gripper, Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, 2016, no. 8, vol. 17, pp. 525-530 (in Russian).

10. Vorob'eva N.S, Zhoga V. V., Nesmiyanov I. A. Program Displacement Tracing of executive devices by the manipulator drives of parallel-sequential Structures, Izvestiva Rossiyskov Akademii Nauk. Teoriya i Sistemy Upravleniya, 2019, no. 2, pp. 154-165 (in Russian).

11. Vorob'eva N. S. Zhoga V. V., Nesmiyanov I. A., Dyashkin A. V. Kinematic Synthesis of Programmed Motions of Drivers of a Manipulator-Tripod with a Three-Degree Gripper, Springer Nature Switzerland AG 2019 A. N. Evgrafov (ed.), Advances in Mechanical Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering, available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-11981-2.

12. Vorob'eva N. S., Dyashkin-Titov V. V., Zhoga V. V., **Nesmiyanov I. A.** Dynamics of a parallel – sequential structure manipulator based on a tripod, Mashinostroenie i Inzhenernoe Obrazovanie, 2017, no. 3, pp. 32-41 (in Russian).

13. Lur'e A. I. Analytical Mechanics, Moscow, Nauka, Fizmatlit, 1961, 824 p. (in Russian).

14. Jan Brinker, Burkhard Corves. Lagrangian Based Dynamic Analyses of Delta Robots with Serial-Parallel Architecture ROMANSY 21 - Robot Design, Dynamics and Control, 2016, vol. 569, pp. 133-141.

15. Staicu S. Dynamics modelling of a Stewart-based hybrid parallel robot, Adv. Robot, 29(14), 2015, pp. 929-938.

16. Ibrahim O., Khalil W. Inverse and direct dynamic models of hybrid robots, Mech. Mach. Theory, 45(4), 2010, pp. 627-640.

17. Abhishek, S. Bellary, Monika Keerthana, M. Srinivasan, V. S. Varun, A. Dash, Anjan Kumar. Modelling and Workspace Analysis of Parallel-Serial Hybrid Manipulator, Applied Mechanics and Materials, 2015, pp. 1028-1031.

18. Krut'ko P. D. Inverse problems of dynamics of controlled systems: nonlinear models, Moscow, Nauka, Fizmatlit, 1988, 328 p. (in Russian).

19. Vorob'eva N. S., Zhoga V. V., Dyashkin-Titov V. V., Dyashkin A. V. Development of a model base for a parallel-sequential manipulator structur), Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki, 2017, no. 9, pp. 143-152 (in Russian).

20. Kolovskiy M. Z., Sloushch A. V. Foundations of Industrial Robot Dynamics, Moscow, Nauka, Fizmatlit, 1998, 240 p. (in Russian).

21. Pol R. Simulation, trajectory planning, and motion control of the robot manipulator, Trans. from the English, Moscow, Nauka, Fizmatlit, 1976, 104 p. (in Russian).



## УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, опубликованных в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление" в 2020 г.

### СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Grigoriev V. V., Bystrov S. V., Mansurova O. K., Pershin I. M., Bushuev A. B., Petrov V. A. Exponential Stability Regions Estimation of Nonlinear Dynamical Systems. № 3
- Sergeev S. F. Artificial Intelligence in Mechatronic Systems: Problems of Embodiment. № 2
- Алиев Т. А., Мусаева Н. Ф., Сулейманова М. Т. Алгоритмы построения доверительного интервала для математического ожидания помехи и их применение для контроля динамики развития аварий. № 9
- Беззубов В. А., Бобцов А. А. Алгоритм идентификации параметров неизмеряемого синусоидального возмущения с нестационарной амплитудой. № 8
- Борисов О. И., Даль А. Р., Пыркин А. А., Громова Ф. Б., Щетне Р. Последовательный компенсатор в задаче удержания положения надводного судна. № 10
- Воротников В. И., Мартышенко Ю. Г. О детектируемости по части переменных нелинейных дискретных систем. № 3
- Гайворонский С. А., Езангина Т. А., Хожаев И. В. Параметрический синтез робастного регулятора на основе метода доминирующих полюсов. № 1
- Городецкий В. И., Юсупов Р. М. Искусственный интеллект: метафора, наука и информационная технология. № 5
- Дат Во Куок, Бобцов А. А. Управление по выходу линейными нестационарными системами с использованием методов параметрической идентификации. № 7
- Жирабок А. Н., Зуев А. В., Бобко Е. Ю., Филатов А. Л. Решение задачи аккомодации в нелинейных системах с использованием линейных методов. № 1
- Жмудь В. А., Востриков А. С., Ивойлов А. Ю., Саблина Г. В. Синтез робастных ПИД регуляторов методом двойной оптимизации. № 2

- Иванников А. Д., Стемпковский А. Л. Итерационные методы решения систем многозначных логических уравнений при моделировании цифровых систем управления объектами. № 9
- Имангазиева А. В. Синхронизация сети нелинейных объектов с запаздыванием по состоянию в условиях неопределенности. № 5
- Карабутов Н. Н. Применение структур для оценки характеристических показателей Ляпунова систем с периодическими коэффициентами. № 1
- Карабутов Н. Н. S-синхронизация, структурная идентифицируемость и идентификация нелинейных динамических систем. № 6
- Карсаев О. В. Модификация CGR-алгоритма маршрутизации данных в коммуникационной сети группировки спутников. № 2
- Козырев В. Г. Синтез аддитивного терминального управления одноосным движением нелинейных объектов. № 7
- Куцый А. П., Куцый Н. Н., Маланова Т. В. Определение области робастной устойчивости системы на основе теоремы В. Л. Харитонова. № 4
- **Ловчаков В. И.** Синтез линейных систем управления с максимальным быстродействием и заданным перерегулированием. № 9
- Оморов Р. О. Метод топологической грубости в задачах исследования и управления синергетическими системами. № 5
- Рзаев Т. Г. Оптимальное управление переходными процессами объектов по быстродействию в многокритериальной среде. № 4
- Рустамов Г. А. Некоторые проблемы реализуемости при точном решении задач управления. № 10
- Сухинин Б. В., Сурков В. В. Аналитическое конструирование робастных оптимальных по быстродействию систем управления с бесконечно большим коэффициентом усиления. № 8
- Тырва В. О., Саушев А. В. О реализации совмещаемых управляющих воздействий на объект в системах "человек—машина". № 5
- Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Управление нулями и полюсами в задачах синтеза систем регулирования. Часть І. Компенсационный подход. № 8

- Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Управление нулями и полюсами в задачах синтеза систем регулирования. Часть II. Компенсационно-модальный подход. № 11
- Фуртат И. Б., Гущин П. А., Перегудин А. А. Подавление возмущений с минимизацией эллипсоидов, ограничивающих фазовые траектории системы в переходном и установившемся режимах. № 4
- Шадрин Г. К.. Синтез алгоритма управления нелинейным объектом на основе коррекции динамики объекта и компенсации возмущений. № 12
- Шибанов Г. П. Автоматизированный контроль авиадвигателей в условиях их стендовых испытаний. № 2

### АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

- Rzayev A. H., Guluyev G. A., Pashayev F. H., Rzayev As. H., Asadova R. Sh. Mathematical Models for Determining the Distribution of Fluid Flow Temperature along the Wellbore and Horizontal Pipeline. № 6
- Алиев Т. А., Мусаева Н. Ф., Газызаде Б. И. Технологии мониторинга динамики развития повреждений на буровых установках с использованием моментов высоких порядков помехи. № 4
- Андриевская Н. В., Андриевский О. А., Кузнецов М. Д., Леготкина Т. С., Никулин В. С., Сторожев С. А., Хижняков Ю. Н., Южаков А. А. Нейронечеткое управление выбросами вредных веществ авиационного газотурбинного двигателя. № 6
- Гулуев Г. А., Рзаев Ас.Г., Пашаев Ф. Г. Анализ процессов механизированной добычи нефти методами теории электрических цепей. № 12
- **Круглов С. П., Аксаментов Д. Н.** Метод адаптивного управления мостовым краном с прямым отслеживанием перемещения груза. № 12
- Рябчиков М. Ю., Рябчикова Е. С., Кокорин И. Д. Система стабилизации температуры в нагревательной печи с применением скользящего регулирования и нечеткой логики. № 3

- Серебренный В. В. Коллаборативные мультиагентные системы — альтернатива полной автоматизации производства. № 7
- Тагирова К. Ф., Нугаев И. Ф. Концептуальные основы автоматизации управления установками электроцентробежных насосов нефтедобывающих скважин. № 2
- Фуртат И. Б., Нехороших А. Н., Гущин П. А., Чугина Ю. В. Синхронизация электроэнергетической сети в условиях высокочастотных помех измерения. № 10
- Шакиров С. Р., Квашнин А. Г., Писарев А. В. Разработка и исследование математических моделей элементов газовоздушного тракта для создания АСУ ТП установки переработки органических отходов. № 10
- Шемякин А. Н., Рачков М. Ю., Соловьев Н. Г., Якимов М. Ю. Управление мощностью излучения технологического СО<sub>2</sub>-лазера с несамостоятельным тлеющим разрядом путем изменения частоты импульсов ионизации. № 4

### РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Belopukhov V. N., Borovik S. Yu., Podlipnov P. E., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P. System for Measuring of Radial Clearances in Gas-Turbine Engine with Self-Compensation of Temperature Effectsonthe Sensor. № 5
- **Darintsev O. V., Migranov A. B.** A Step-by-Step Algorithm for Finding the Optimal Strategy for the Behavior of a Group of Robots. № 12
- Gaiduk A. R., Martjanov O. V., Medvedev M. Yu., Pshikhopov V. Kh., Hamdan N., Farhood A. Neural Network Based Control System for Robots Group Operating in 2-d Uncertain Environment. № 8
- Kostyukov V. A., Medvedev M. Yu., Pavlenko D. D., Mayevsky A. M., Poluyanovich N. K. Investigation of a Rotor Speed Controlling of a Promising Wind-Driver Power Plant Using Several Variable Elements of its Geometry. № 10
- Kutsyi A. P., Kutsyi N. N. The Gradient-Based Algorithm for Parametric Optimizationofa Variable Structure PI Controller with Dead Band. № 9

Myshlyaev Y. I., Finoshin A. V., Nguyen Chi Thanh. Energy-Based Adaptive Oscillation Control of the Electromechanical Systems. № 7

- Быков Н. В., Власова Н. С., Губанов М. Ю., Лапин Д. В. Механизм вертикального перемещения мобильного гусеничного робота с гибридным магнитно-ленточным принципом сцепления. № 3
- Воробьева Н. С., Жога В. В., Жога Л. В. Динамический синтез алгоритмов управления манипулятором параллельно-последовательной структуры. № 12
- Ворочаева Л. Ю., Савин С. И., Яцун А. С. Исследование работы системы корректировки длины корпуса в процессе изменения конфигурации трехзвенного ползающего робота. № 4
- Галимова Г. Р., Волков В. Г., Ахметзянов И. З. Упреждающее многосвязное управление движением автопоезда по криволинейной траектории. № 10
- Глущенко А. И., Петров В. А., Ласточкин К. А. Разработка адаптивной системы управления балансирующим роботом на основе второго метода Ляпунова с переменным шагом настройки. № 5
- Горячева И. Г., Досаев М. З., Селюцкий Ю. Д., Яковенко А. А., Hsiao С.-Н., Huang С.-Yu., Ju M.-S., Yeh C.-H. Управление внедрением индентора в вязкоупругую ткань с использованием пьезоэлектрического привода. № 5
- Доценко А. В. Синтез системы разрешения коллизий для группы роботов в парадигме обучения без учителя. № 7
- **Иванов В. М.** Имитационная модель системы стабилизации скорости резания для металлорежущих станков с ЧПУ. № 2
- Карташев В. А., Карташев В. В. Управление траекторией торможения манипулятора с неисправным приводом методом задержек включения тормозов. № 1
- **Кузьменко А. А.** Робастное управление синхронным двигателем с постоянными магнитами: синергетический подход. № 8
- Лавровский Э. К., Письменная Е. В. О походках оператора в пассивном экзоскелете нижних конечностей при использовании режима за-крепленного колена. № 1
- Машошин А. И., Пашкевич И. В. Проблемные вопросы интеллектуализации процессов

управления автономными необитаемыми подводными аппаратами. № 10

- **Поливанов А. Ю., Иванов Ю. В., Холин Д. В.** Методика преобразования координат системы технического зрения промышленного робота для операции лазерной сварки. № 3
- Сергеев С. Ф., Филимонов Н. Б. У истоков отечественной робототехники и мехатроники: Евгений Иванович Юревич в жизни и науке. № 10
- Филаретов В. Ф., Губанков А. С., Горностаев И. В. Метод формирования программной скорости движения рабочего инструмента многостепенного манипулятора. № 12
- Юхимец Д. А. Разработка метода формирования траекторий движения группы подводных роботов в среде с препятствиями во время их обхода. № 6

### ДИНАМИКА, БАЛЛИСТИКА И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

- **Do Quang Thong.** Synthesis of High-Precision Missile Homing System Using Proportional Guidance Method. № 4
- **Kulik A. A.** Development of a Method for Computation of Aircraft Safety Control Signal. № 11
- Абдулин Р. Р., Тимофеев Д. С., Крылов Н. В., Кравченко А. А., Зайцев И. В., Самсонович С. Л., Рожнин Н. Б., Ларин А. П., Макарин М. А. Разработка и исследование математической модели работы пары активных ручек управления самолетом в среде МАТLAB. № 3
- Буряк Ю. И., Скрынников А. А. Алгоритм рационального планирования и распределения ресурсов при подготовке группы летательных аппаратов к применению в условиях неопределенности. № 6
- Воронов Е. М., Карпунин А. А., Палкин М. В., Титков И. П. Оптимальное управление относительным движением группы космических аппаратов. № 11
- **Дивеев А. И., Шмалько Е. Ю., Хуссейн О.** Управление квадрокоптером методом сетевого оператора на основе многоточечной стабилизации. № 7
- Заведеев А. И. Повышение надежности системы управления космическим аппаратом

на основе грубых моделей диагностики и принципа разделения в пространстве паритетов. № 4

- Кабанов С. А., Зимин Б. А., Митин Ф. В. Разработка и исследования математических моделей раскрытия подвижных частей трансформируемых космических конструкций. Часть І. № 1
- Кабанов С. А., Зимин Б. А., Митин Ф. В. Разработка и исследование математических моделей раскрытия подвижных частей трансформируемых космических конструкций. Часть II. № 2
- Карсаев О. В. Методика оценки влияния пропускной способности каналов связи на эффективность функционирования группировки спутников. № 9
- **Левин Д. Н., Пономаренко А. В., Цигин Ю. П.** Автоматизация процессов эргономической экспертизы информационно-управляющего поля кабины перспективного самолета. № 8

- **Левский М. В.** Аналитическое решение задачи оптимального управления разворотом космического аппарата с минимальной энергией вращения. № 3
- Муслимов Т. З., Мунасыпов Р. А. Децентрализованное групповое нелинейное управление строем беспилотных летательных аппаратов самолетного типа. № 1
- Скобелев П. О., Галузин В. А., Матюшин М. М., Кутоманов А. Ю. Обзор современных методов планирования работы перспективных космических систем. № 11
- Солдаткин В. М., Солдаткин В. В., Никитин А. В., Соколова Г. П. Обеспечение динамической точности системы воздушных сигналов самолета с неподвижным невыступающим приемником потока. № 9
- Шевченко А. М., Начинкина Г. Н., Городнова М. В. Разработка энергетического метода и исследование алгоритмов прогнозирования траектории взлета самолета. № 6

#### Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

107076, Москва, Стромынский пер., 4

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

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

Сдано в набор 30.09.2020. Подписано в печать 12.11.2020. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН1220. Цена договорная.

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

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

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



### Завалишинские чтения 2021

организаторъ

• Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП, Санкт-Петербург)

• Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН, Санкт-Петербург)

• Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ, Курск)

 Уфимский государственный нефтяной технический университет (УГНТУ, Уфа)

#### ЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

#### Робототехника и автоматизация:

- управление роботами и связь
- электроприводы и мехатронные модули
- взаимодействие человека и робота
- сенсорные сети и облачные сервисы для роботов
- киберфизические системы

#### Электроэнергетика:

- преобразование электроэнергии
- системы возобновляемых источников энергии
- электроэнергетические системы и сети
- менеджмент в электроэнергетике

XV Международная научно-техническая конференция ВИБРАЦИЯ-2021. Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины"

Международная конференция электротехнологии и электрооборудование предприятий"

научно-техническая "Электропривод,

## XVI международная конференция по электромеханике и робототехнике Санкт-Петербург, Россия 14-17 Апреля,

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

2021

## ПРЕДСЕДАТЕЛЬ КОНФЕРЕНЦИИ:

• Антохина Юлия Анатольевна - д-р экон. наук., проф., ректор ГУАП

СОПРЕДСЕДАТЕЛИ КОНФЕРЕНЦИИ:

• Баулин Олег Александрович - к.т.н, доцент, врио ректора УГНТУ

• Емельянов Сергей Геннадьевич - д-р техн. наук, проф., ректор ЮЗГУ

• Шишлаков Владислав Федорович - д-р техн. наук, проф., проректор по образовательным технологиям и инновационной деятельности ГУАП

#### ПРЕДСЕДАТЕЛЬ ПРОГРАММНОГО КОМИТЕТА:

• Ронжин Андрей Леонидович - д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой электромеханики и робототехники ГУАП, директор СПИИРАН

#### ВАЖНЫЕ ДАТЫ

15 января 2021 года ..... Представление статей 15 февраля 2021 года ..... Уведомление о принятии 01 марта 2021 года ..... Регистрация и подача

финальной версии статьи

14-17 апреля 2021 года ..... Проведение конференции

### ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДОКЛАДОВ

Статьи подаются через онлайн систему:

https://easychair.org/conferences/?conf=erzr2021). Статьи, представленные на Завалишинские чтения 2021, не должны рассматриваться на другой конференции и быть опубликованы ранее или приняты для публикации в другом издании. В английский сборник авторы представляют статью размером 10-12 страниц, отформатированную в стиле Springer. После уведомления о приеме статьи авторы получат дополнительную информацию о регистрации.

#### <u>КОНТАКТЫ</u>

Электронная почта: zav-read@guap.ru Русскоязычная версия сайта конференции: http://confs.guap.ru/zav-read Англоязычная версия сайта конференции: http://suai.edu.ru/conference/zav-read

#### ТРУДЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Труды конференции с представленными очно докладами будут опубликованы в трех сборниках: на русском языке (издание с ISBN), на русском языке с индексацией в РИНЦ, на английском языке с индексацией в WoS/Scopus (труды конференции ER(ZR)-2021 включены в перечень предстоящих изданий Springer).

#### МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ

Конференция будет проведена на базе Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, Большая Морская ул., 67, Санкт-Петербург, Россия.

