ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

МАУ МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 12 (165)
декабрь
2014

Редакционный совет:
BIDYADHAR S., PhD, prof.
JEN-HWA GUO, PhD, prof.
JERRY L., PhD, prof.
KATALINIC B., PhD, prof.
АЛИЕВ Т. А., акад. НАНА, проф.
АНШАКОВ Г. П., чл.-корр. РАН, проф.
БОЛОТНИК Н. Н., чл.-корр. РАН, проф.
ВАСИЛЬЕВ С. Н., акад. РАН, проф.
КАЛЯЕВ И. А., чл.-корр. РАН, проф.
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г., чл.-корр. НАНБ, проф.
КУЗНЕЦОВ Н. А., акад. РАН, проф.
ЛЕОНОВ Г. А., чл.-корр. РАН, проф.
МАТВЕЕНКО А. М., акад. РАН, проф.
МИКРИН Е. А., акад. РАН, проф.
ПЕШЕХОНОВ В. Г., акад. РАН, проф.
РЕЗЧИКОВ А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
СЕБРЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН, проф.
СИГОВ А. С., акад. РАН, проф.
СОЙФЕР В. А., чл.-корр. РАН, проф.
СОЛОВЬЕВ В. А., чл.-корр. РАН, проф.
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М., чл.-корр. РАН, проф.
ФЕДОРОВ И. Б., акад. РАН, проф.
ЧЕНЦОВ А. Г., чл.-корр. РАН, проф.
ЧЕРНОУСЬКО Ф. Л., акад. РАН, проф.
ЩЕРБАТЮК А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
ЮСУПОВ Р. М., чл.-корр. РАН, проф.

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

Заместители гл. редактора:
ПОДУРАЕВ Ю. В., д. т. н., проф.
ПУТОВ В. В., д. т. н., проф.
ЮЩЕНКО А. С., д. т. н., проф.

Ответственный секретарь:
БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:
АЛЕКСАНДРОВ В. В., д. ф.-м. н., проф.
АНТОНОВ Б. И.
АРШАНСКИЙ М. М., д. т. н., проф.
БУКОВ В. Н., д. т. н., проф.
ВИТТИХ В. А., д. т. н., проф.
ГРАДЕЦКИЙ В. Г., д. т. н., проф.
ИВЧЕНКО В. Д., д. т. н., проф.
ИЛЬЯСОВ Б. Г., д. т. н., проф.
КОЛОСОВ О. С., д. т. н., проф.
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф., д. т. н., проф.
ЛЕБЕДЕВ Г. Н., д. т. н., проф.
ЛОХИН В. М., д. т. н., проф.
ПАВЛОВСКИЙ В. Е., д. ф.-м. н., проф.
ПРОХОРОВ Н. Л., д. т. н., проф.
ПШИХОПОВ В. Х., д. т. н., проф.
РАПОПОРТ Э. Я., д. т. н., проф.
СЕРГЕЕВ С. Ф., д. пс., с. н. с.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д. т. н., проф.
ФРАДКОВ А. Л., д. т. н., проф.
ФУРСОВ В. А., д. т. н., проф.
ЮРЕВИЧ Е. И., д. т. н., проф.

Редакция:
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Робастная коррекция в системах управления с большим коэффициентом усиления . . . 3

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Карабутов Н. Н., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П. Модели адаптивного управления на базе ассоциативной памяти . . . 11

УПРАВЛЕНИЕ В МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Александров А. Ю., Александрова Е. Б. Одноосная стабилизация твердого тела при наличии запаздывания в обратной связи . . . 18

Косов А. А. О построении стабилизирующего управления для одной механической системы с переключениями . . . 23

ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Сергеев С. Ф. Механизмы аутопоэтической самоорганизации и проблемы управления в технобиосфере . . . 27

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Романов А. М., Петровская А. К., Слащёв Б. В. Исследование возможностей адаптации современных сервоприводов переменного тока для управления двигателями постоянного тока . . . 34

Журнал в журнале

"УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"

Афонин А. А., Тювин А. В., Сулаков А. С. Аппаратный и алгоритмический способы уменьшения погрешностей инерциальных датчиков гравиинерциальных комплексных систем . . . 42

Распопов В. Я. Гиродины как объекты изучения по направлению высшего профессионального образования "Системы управления движением и навигация". Часть 1. Применение, кинематика, функционирование . . . 52

Лобусов Е. С., Фомичев А. В. Формирование алгоритмов бесплатформенной инерциальной системы навигации и основных режимов функционирования системы управления малогабаритного космического аппарата. Часть 1 . . . 60

Указатель статей, опубликованных в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление" в 2014 году . . . 66

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

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

© Издательство "Новые технологии", "Мехатроника, автоматизация, управление", 2014

THEORETICAL AND APPLIED SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL

№ 12 (165)
Desember
2014

MEHATRONIKA, AVTOMATIZACIA, UPRAVLENIE

Editorial Council:
ALIEV T. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.
ANSHAKOV G. P., Dr. Sci. (Tech.), prof.
BIDYADHAR S., PhD, prof.
BOLOTNIK N. N., Dr. Sci. (Phys-.Math.), prof.
VASILYEV S.N., Dr. Sci. (Phys-.Math.), prof.
JEN-HWA GUO, PhD, prof.
JERRY L., PhD, prof.
KALYAEV I. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.
KATALINIC B., PhD, prof.
KRASNEVSKIY L. G., Dr. Sci. (Tech.), prof.
KUZNETSOV N. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.
LEONOV G. A., Dr. Sci. (Phys-.Math.), prof.
MATVEENKO A. M., Dr. Sci. (Tech.), prof.
MIKRIN E. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.
PESHEKHONOV V. G., Dr. Sci. (Tech.), prof.
REZCHIKOV A. F., Dr. Sci. (Tech.), prof.
SEBRYAKOV G. G., Dr. Sci. (Tech.), prof.
SIGOV A. S., Dr. Sci. (Phys-.Math.), prof.
SOJFER V. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.
SOLOVJEV V. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.
SOLOMENTSEV Yu. M., Dr. Sci. (Tech.), prof.
FEDOROV I. B., Dr. Sci. (Tech.), prof.
CHENTSOV A. G., Dr. Sci. (Phys-.Math.), prof.
CHERNOUSKO F. L., Dr. Sci. (Phys-.Math.), prof.
SCHERBATYUK A. F., Dr. Sci. (Tech.), prof.
YUSUPOV R. M., Dr. Sci. (Tech.), prof.

Editor-in-Chief:
FILIMONOV N. B., Dr. Sci. (Tech.), prof.

Deputy Editor-in-Chief:
PODURAEV Yu. V., Dr. Sci. (Tech.), prof.
PUTOV V. V., Dr. Sci. (Tech.), prof.
YUSCHENKO A. S., Dr. Sci. (Tech.), prof.

Responsible Secretary:
BEZMENOVA M. Yu.

Editorial Board:
ALEXANDROV V. V., Dr. Sci. (Phys-.Math.), prof.
ANTONOV B. I.
ARSHANSKY M. M., Dr. Sci. (Tech.), prof.
BUKOV V. N., Dr. Sci. (Tech.), prof.
VITTIKH V. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.
GRADETSKY V. G., Dr. Sci. (Tech.), prof.
IVCHENKO V. D., Dr. Sci. (Tech.), prof.
ILYASOV B. G., Dr. Sci. (Tech.), prof.
KOLOSOV O. S., Dr. Sci. (Tech.), prof.
KOROSTELEV V. F., Dr. Sci. (Tech.), prof.
LEBEDEV G. N., Dr. Sci. (Tech.), prof.
LOKHIN V. M., Dr. Sci. (Tech.), prof.
PAVLOVSKY V. E., Dr. Sci. (Phys-.Math.), prof.
PROKHOROV N. L., Dr. Sci. (Tech.), prof.
PSHIKHOPOV V. Kh., Dr. Sci. (Tech.), prof.
RAPOPORT E. Ya., Dr. Sci. (Tech.), prof.
SERGEEV S. F., Dr. Sci. (Psyhol.), prof.
FILARETOV V. F., Dr. Sci. (Tech.), prof.
FRADKOV A. L., Dr. Sci. (Tech.), prof.
FURSOV V. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.
YUREVICH E. I., Dr. Sci. (Tech.), prof.

Editorial Staff:
GRIGORIN-RYABOVA E.V.

CONTENTS

CONTENTS METHODS OF THE THEORY OF AUTOMATIC CONTROL

Filimonov A. B., Filimonov N. B. Robust Correction in Control Systems with High Gain . . 3

INTELLECTUAL TECHNOLOGIES IN THE PROBLEMS CONTROL AND INFORMATION PROCESSING

Karabutov N. N., Lokhin V. M., Manko S. V., Romanov M. P. Models of Adaptive Control on the Base of Associative Memory 11

CONTROL IN MECHANICAL SYSTEMS

Aleksandrov A. Yu., Aleksandrova E. B. Monoaxial Stabilization of a Rigid Body under a Delay in Feedback Law 18

Kosov A. A. Design of Stabilizing Control for One Switching Mechanical System 23

ERGATIC CONTROL SYSTEMS

Sergeev S. F. Mechanisms Autopoietic Self-Organization and Control Problems in Technobiosphere 27

ACTUATORS OF MECHATRONIC SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

Romanov A. M., Petrovskaya A. K., Slashchev B. V. Usage of Modern Alternating Current Servo Drives for Direct Current Motors Control 34

Journal within journal

"CONTROL AND INFORMATICS IN THE AEROSPACE AND MARINE SYSTEMS"

Afonin A. A., Tyuvin A. V., Sulakov A. S. Hardware and Algorithmic Methods of Reducing Errors of Graviinertial Complex Systems Inertial Sensors 42

Raspopov V. Ya. Gyrodyn as Learning Subject of "Control Systems of Movement and Navigation" Discipline of Higher Professional Education. Part 1. Application, Kinematic and Functioning 52

Lobusov E. S., Fomichev A. V. Forming of Strapdown Inertial Navigation System Algorithms and Main Control Modes for Small-Sized Spacecraft. Part 1 60

Index of articles published in the journal "Mehatronica, avtomatizacia, upravlenie" in 2014 66

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

© Издательство "Новые технологии", "Мехатроника, автоматизация, управление", 2014

УДК 62-50:681.5.01

А. Б. Филимонов[1], д-р техн. наук, проф., filimon_ab@mail.ru,
Н. Б. Филимонов[2], д-р техн. наук, проф., nbfilimonov@mail.ru,
[1] Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики,
[2] Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

Робастная коррекция в системах управления с большим коэффициентом усиления*

Исследуется механизм робастной коррекции в системах с большим коэффициентом усиления. Обсуждаются вопросы его применения в задачах синтеза систем управления с эталонной динамикой для объектов с параметрической неопределенностью.

Ключевые слова: *параметрическая неопределенность, большой коэффициент усиления, схема робастной коррекции, синтез систем управления, эталонная динамика*

Свойство робастности системы автоматического управления (САУ) означает ее работоспособность и нормальное функционирование в условиях неопределенности динамических характеристик объекта управления (ОУ). Исследования по проблеме робастного синтеза систем проводятся в широком спектре направлений, различающихся исходными допущениями о типе и способе формализации неопределенностей.

В работе авторов [1] обсуждалась ретроспектива и теоретические аспекты двух популярных в отечественных научных кругах методов синтеза робастных САУ: *метода больших коэффициентов усиления*, предложенного в работе М. В. Меерова [2], и *метода управления по высшей производной от выходной переменной*, идея которого высказана в работах Р. А. Хэддеда [3] и Г. С. Поспелова [4]. Отметим, что логическим итогом развития данных методов является их объединение (см., например, [5, § 4.6]. Данный подход разрабатывался рядом авторов, среди которых следует выделить работы А. С. Вострикова, Л. М. Бойчука, А. П. Батенко, А. В. Тимофеева, П. Д. Крутько и др. (см., например, работы [6—8]).

Альтернативой робастности является свойство адаптивности управляемых процессов, базирующееся на принципах структурно-параметрической перестройки системы в целях ее приспособления к изменениям динамических характеристик объекта и внешней среды. Следует заметить, что класс САУ, в которых свойство робастности обеспечивается посредством большого коэффициента усиления, иногда называют *системами с пассивной адаптацией* (см., например, [9, п. 4.4.1], что, на наш взгляд, не совсем корректно.

Основные проблемные аспекты робастного синтеза САУ на основе применения механизма большого усиления сигналов в контуре управления представлены в работах П. Д. Крутько [10—12, пп. 4.2.1—4.2.2]. Дадим краткую характеристику предлагаемых им решений применительно к классу линейных задач управления.

Динамика ОУ описывается линейной стационарной моделью "вход—выход", причем рассматривается крайний случай, когда отсутствует какая-либо априорная информация о параметрах объекта. Желаемое динамическое качество синтезируемой САУ представлено эталонной передаточной функцией по каналу "уставка—выход". В структуру закона управления вводится большой коэффициент усиления и дифференциальное выражение, которое представляет эталонную динамику замкнутой САУ и составлено из выходной переменной и ее производных, включая *высшую* производную, порядок которой совпадает с порядком дифференциального уравнения динамики ОУ.

В данной статье предлагается другая теоретическая схема включения механизма большого усиления в структуру САУ. В ее основе лежит робастная коррекция ОУ как предварительный этап решения задачи управления. В итоге синтезируемая САУ имеет двухконтурную структуру: внутренний контур обеспечивает робастную коррекцию ОУ, а внешний отвечает за достижение цели управления. Такой подход представляется авторам более логичным: он *разделяет* функции коррекции и управления. В итоге при переходе от исходной задачи управления с факторами неопределенности к задаче управления скорректированным объектом фактор неопределенности устраняется. Такой подход применим к более широкому классу задач робастного управления.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты: № 13-08-00161 и № 13-08-00948.

Схема робастной коррекции с большим коэффициентом усиления

Рассмотрим класс конечномерных линейных стационарных объектов управления с одномерными входом $u \in \mathbb{R}$ и выходом $y \in \mathbb{R}$.

Положим, динамические процессы в объекте описываются дифференциальным уравнением n-го порядка:

$$y^{(n)}(t) + \sum_{i=0}^{n-1} a_i^0 y^{(i)}(t) = \sum_{j=0}^{m} b_j^0 u^{(j)}(t),$$

где a_i^0, b_j^0 — вещественные константы, причем $m < n$ и

$$b_m^0 \equiv \beta_0 > 0. \qquad (1)$$

Введем многочлены

$$A_0(s) = s^n + \sum_{i=0}^{n-1} a_i^0 s^i,\ B_0(s) = \sum_{j=0}^{m} b_j^0 s^j.$$

Условимся для любого многочлена $F(s)$ через lcoef $F(s)$ обозначать его старший коэффициент, так что

$$\mathrm{lcoef}\, A_0(s) = 1 \text{ и } \mathrm{lcoef}\, B_0(s) = \beta_0.$$

Динамика объекта описывается уравнением в операторной форме:

$$A_0(\mathrm{D})y(t) = B_0(\mathrm{D})u(t),$$

где $\mathrm{D} \equiv \dfrac{d}{dt}$, а $A_0(\mathrm{D})$ и $B_0(\mathrm{D})$ — операторные многочлены.

Передаточная функция (ПФ) объекта равна

$$W_0(s) = \frac{B_0(s)}{A_0(s)}, \qquad (2)$$

здесь и далее s — комплексная частота.

Корректирующие звенья вводятся в САУ в целях изменения ее динамических и статических свойств. Схемы коррекции с большим коэффициентом усиления позволяют формировать динамическое поведение управляемого объекта в соответствии с заданной эталонной моделью в условиях параметрической неопределенности в динамике объекта.

Обратимся к схеме коррекции (СК) объекта управления, представленной на рис. 1. Здесь v — вход системы коррекции. Схема включает два элемента: усилительное звено с коэффициентом усиления K в прямой цепи и корректирующую обратную связь, включающую корректирующее звено (КЗ).

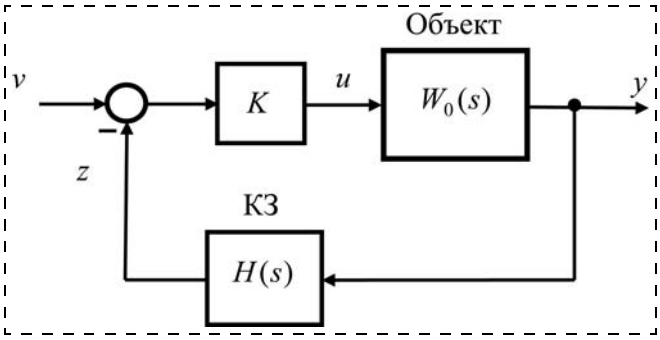

Рис. 1

Исследуем динамические свойства рассматриваемой схемы коррекции при больших значениях коэффициента усиления: $K \gg 1$.

Далее полагаем, что измеряется выход объекта и его производные до d-й включительно, т. е. измерительную базу составляют переменные

$$y_k = y^{(k-1)},\ k = 1{:}d + 1. \qquad (3)$$

Пусть ПФ КЗ является многочленом

$$H(s) = \sum_{k=0}^{d} h_k s^k, \qquad (4)$$

h_k — вещественные константы, причем

$$h_d \equiv \beta_H > 0.$$

Отметим физическую реализуемость корректирующего звена. Действительно, согласно схеме на рис. 1 и формуле (4) действие КЗ описывается уравнением

$$z(t) = \sum_{k=0}^{d} h_k y^{(k)}(t). \qquad (5)$$

Таким образом, вопрос физической реализуемости КЗ определяется возможностью формирования сигнала $z(t)$ в соответствии с соотношением (5). Но последнее с учетом (3) принимает вид

$$z(t) = \sum_{k=0}^{d} h_k y_{k+1}(t)$$

и, следовательно, физически реализуемо.

Передаточная функция *скорректированного объекта* (СО) равна

$$V(K, s) = \frac{KW_0(s)}{1 + KW_0(s)H(s)}.$$

Подставляя в это выражение (2), получим

$$V(K, s) = \frac{KB_0(s)}{\Delta_0(K, s)}. \qquad (6)$$

Здесь $\Delta_0(K, s)$ — характеристический многочлен СО:

$$\Delta_0(K, s) = A_0(s) + KA_1(s), \qquad (7)$$

причем

$$A_1(s) = B_0(s)H(s). \qquad (8)$$

Заметим, что

$$\deg\Delta_0(s) = \deg A_0(s) = n,\ \deg A_1(s) = m + d \qquad (9)$$

и

$$\beta \equiv \mathrm{lcoef}\, A_1(s) = \beta_0\beta_H. \qquad (10)$$

Асимптотические свойства скорректированного объекта

Исследуем структуру полюсов СО при $K \gg 1$. Обозначим через $\Lambda(K)$ множество корней его характеристического многочлена (7). Каждому корню $\lambda \in \Lambda(K)$ отвечает мода — экспоненциальное решение вида (П10) (см. Приложение). Поведение данных корней при $K \gg 1$ позволяет понять материал Приложения (см. теорему в Приложении).

При $K \to \infty$ у многочлена (7) имеются инфинитные (т. е. уходящие в бесконечность) корни. Они образуют некоторое подмножество $\Lambda_\infty(K) \subset \Lambda(K)$, причем их число равно

$$n_\infty = \deg A_0(s) - \deg A_1(s).$$

Корни $\lambda \in \Lambda_\infty(K)$ характеризуются следующими свойствами:

1) $\lim\limits_{K\to\infty} \mathrm{Re}\lambda(K) = -\infty$;

2) $\lim\limits_{K\to\infty} \mathrm{Im}\lambda(K) = \infty$;

3) $\lim\limits_{K\to\infty} \mathrm{Re}\lambda(K) = \infty$.

Соотношение 1) означает, что в случае $K \gg 1$ мода $\exp(\lambda t)$ является быстро затухающей. Соотношение 2) означает неограниченную частоту колебаний, а 3) — неограниченную степень роста моды $\exp(\lambda t)$. При наличии мод со свойствами 2) и 3) система не может быть работоспособной.

Таким образом, в модальном составе работоспособной СК не должны быть моды с показателями типа 2) и 3). Данное условие соблюдается лишь в случае

$$\deg A_0(s) - \deg A_1(s) = 1,$$

которое с учетом (9) означает, что

$$d = n - m - 1.$$

При этом справедливо приближение

$$\Delta_0(K, s) \cong K(\tau s + 1)A_1(s), \qquad (11)$$

где малая постоянная времени τ определяется формулами (10) и (П9) (см. Приложение).

Замечание. Важно подчеркнуть, что корни числителя $B_0(s)$ передаточной функции объекта становятся корнями характеристического многочлена СО. Это означает, что данная схема коррекции *неприменима* для неминимально-фазовых объектов, а также в случаях, когда эти корни неудовлетворительны с точки зрения требуемого запаса устойчивости синтезируемой системы управления. ■

Перейдем к анализу асимптотических свойств ПФ СО. Согласно (6), (8) и (11)

$$V(K, s) \cong \frac{B_0(s)}{(\tau s + 1)B_0(s)H(s)}. \qquad (12)$$

Сокращая числитель и знаменатель в данной дроби на общий множитель $B_0(s)$, получим

$$V(K, s) \cong \frac{1}{(\tau s + 1)H(s)}. \qquad (13)$$

Поясним физический смысл сократимости дробной ПФ (12) — она означает взаимную *компенсацию* совпадающих передаточных нулей и полюсов СО, что приводит к появлению неуправляемой части системы с характеристическим многочленом $B_0(s)$ [13, 14].

Далее будем исходить из следующего *допущения*: многочлен $B_0(s)$ является гурвицевым, и описанная компенсация порождает полюсы СО, локализованные в допустимой области s-плоскости.

Редуцированная модель скорректированного объекта

Для упрощения анализа динамических процессов в СО можно пренебречь в их структуре быстро затухающими модами. Далее под областью *низких* частот будем понимать область в s-плоскости, отвечающую условию

$$|\tau s| \ll 1. \qquad (14)$$

Поскольку именно на этих частотах проявляется характер протекания процессов управления, при анализе динамики СО можно пренебречь малой постоянной времени τ. Формально полагая

$$\tau = 0,$$

из (13) получим приближение

$$V(K, s) \cong \hat{V}(s), \qquad (15)$$

где

$$\hat{V}(s) = \frac{1}{H(s)}. \qquad (16)$$

Данное выражение имеет смысл *низкочастотной аппроксимации передаточной функции* СО.

Соотношения (15), (16) отражают свойство *робастности* описанной схемы коррекции: скорректированная динамика объекта описывается *редуцированной* динамической моделью порядка d, которая определяется исключительно ПФ КЗ, так что результат коррекции инвариантен к параметрам объекта.

Примечание. Ограничение (1) не является обременительным. Если его снять, то тот же результат достигается инверсией знака сигнала $z(t)$ в цепи обратной связи. ■

Применение робастной коррекции в процессах управления

Обсудим вопросы применения описанной схемы робастной коррекции для синтеза астатических САУ в условиях параметрической неопределенности в динамике объекта.

Обратимся к схеме линейной стационарной САУ, представленной на рис. 2. Здесь y^* — уставка (задающий вход), ε — сигнал рассогласования между уставкой и выходом объекта.

Система включает два контура управления, выполняющие различные функции. Внутренний контур осуществляет робастную коррекцию объекта по изложенной выше схеме и включает два элемента: усилительное звено с коэффициентом усиления K в прямой цепи и корректирующую обратную связь, содержащую КЗ с передаточной функцией $H(s)$. Внешний контур обеспечивает целенаправленное поведение САУ: посредством регулятора с ПФ $R(s)$ осуществляется отработка уставки y^*.

Пусть ПФ регулятора является несократимой рациональной дробью вида

$$R(s) = \frac{B_R(s)}{s^{\rho} A_R(s)}, \tag{17}$$

где ρ — натуральное число:

$$\rho \in \mathbb{Z},\ \rho \geqslant 1, \tag{18}$$

а $A_R(s)$ и $B_R(s)$ — многочлены вида

$$A_R(s) = \sum_{i=0}^{n_R} a_i^R s^i,\ B_R(s) = \sum_{j=0}^{m_R} b_j^R s^j,$$

причем $A_R(s)$ — унитарный многочлен:

$$\mathrm{lcoef} A_R(s) \equiv a_{n_R}^R = 1.$$

Условие физической реализуемости данной ПФ:

$$m_R \leqslant \rho + n_R. \tag{19}$$

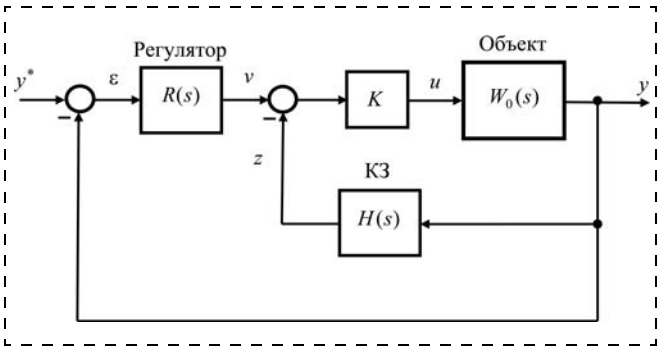

Рис. 2

ПФ замкнутой САУ равна

$$W(K, s) = \frac{R(s)V(K, s)}{1 + R(s)V(K, s)}.$$

Отсюда с учетом (15)—(17) следует низкочастотное приближение

$$W(K, s) \cong \hat{W}(s), \tag{20}$$

где

$$\hat{W}(s) = \frac{B_R(s)}{A(s)}, \tag{21}$$

причем

$$A(s) = s^{\rho} A_R(s) H(s) + B_R(s). \tag{22}$$

Далее будем полагать, что многочлен $H(s)$ является унитарным:

$$\mathrm{lcoef} H(s) \equiv \beta_H = 1.$$

Введем обозначение:

$$N = \deg A(s).$$

Согласно (22)

$$N = \rho + n_R + d. \tag{23}$$

ПФ (21) должна быть правильной дробью:

$$\deg B_R(s) < \deg A(s).$$

Отсюда и из (22) следует неравенство

$$m_R \leqslant \rho + n_R + d - 1.$$

Максимальное значение параметра m_R, которое должно удовлетворять данному условию наряду с (19), определяется равенством

$$m_R = \min(\rho + n_R,\ \rho + n_R + d - 1).$$

Но тогда (здесь нижняя граница достигается при $d = 0$)

$$m_R \geqslant \rho + n_R - 1. \tag{24}$$

Соотношения (21), (22) могут служить основой для структурно-параметрического синтеза САУ. Выбранная структура регулятора (см. (17)) привносит в прямую цепь замкнутой САУ интегратор ρ-го порядка, вследствие чего система обладает астатизмом ρ-го порядка по отношению к уставке y^*.

Настраиваемыми параметрами САУ, вообще говоря, являются все изменяемые коэффициенты многочленов $H(s)$, $A_R(s)$, $B_R(s)$, причем многочлены $A_R(s)$ и $B_H(s)$ являются унитарными. Следовательно, общее число настраиваемых параметров системы равно

$$\tilde{N} = n_R + m_R + d + 1. \tag{25}$$

Обсудим возможность управления параметрами ПФ (21) замкнутой САУ с учетом того, что фиксированы ее структурные параметры ρ и d.

Управление передаточными полюсами

Задача управления полюсами ПФ (21) заключается в достижении равенства

$$A(s) = A^*(s) \tag{26}$$

для заданного унитарного многочлена $A^*(s)$ посредством подходящего выбора настроечных параметров замкнутой системы.

Из (22) и (26) следует функциональное уравнение для неизвестных многочленов $A_R(s)$, $B_R(s)$ и $H(s)$:

$$s^\rho A_R(s)H(s) + B_R(s) = A^*(s). \tag{27}$$

Число неизвестных коэффициентов в левой части данного уравнения равно $\widetilde{N}$, и посредством их выбора необходимо управлять N коэффициентами многочлена $A(s)$. Следовательно, для разрешимости рассматриваемого функционального уравнения необходимо выполнение условия $\widetilde{N} \geqslant N$. Но оно заведомо выполняется, поскольку согласно (23), (24) и (25)

$$\widetilde{N} - N \geqslant n_R \geqslant 0.$$

Предложение 1. Желаемая настройка САУ (26) всегда возможна для произвольного многочлена $A^*(s)$ степени

$$\deg A^*(s) = N \geqslant \rho + d. \blacksquare$$

Доказательство. Конструктивным доказательством данного предложения является следующий пошаговый алгоритм определения искомых настроечных параметров:

Шаг 1. Находим степень многочлена $A_R(s)$:

$$n_R = \deg A_R(s) = N - \rho - d.$$

Шаг 2. Выбираем произвольным образом унитарный многочлен $A_R(s)$ степени n_R.

Шаг 3. Посредством деления многочлена $A^*(s)$ на многочлен $s^\rho A_R(s)$ находим искомые многочлены — частное $H(s)$ и остаток $B_R(s)$. □

Управление передаточными нулями и полюсами

Теперь обратимся к задаче синтеза САУ с желаемой ПФ по каналу "уставка—выход". Воспользуемся описанной схемой робастной коррекции, а функциональные требования к синтезируемой САУ свяжем с низкочастотным приближением (20):

$$\hat{W}(s) = W^*(s). \tag{28}$$

Здесь $W^*(s)$ — заданная эталонная ПФ. Полагаем, что она задана в виде рациональной дроби:

$$W^*(s) = \frac{B^*(s)}{A^*(s)}, \tag{29}$$

где $A^*(s)$ и $B^*(s)$ — многочлены вида

$$A^*(s) = s^N + \sum_{i=0}^{N-1} a_i^* s^i,\ B^*(s) = \sum_{j=0}^{M} b_j^* s^j, \tag{30}$$

причем $A^*(s)$ — устойчивый многочлен.

Заметим, что в соответствии с требованием астатизма к синтезируемой САУ эталонная ПФ должна отвечать условию

$$W^*(0) = 1,$$

которое с учетом (29) и (30) означает

$$a_0^* = b_0^*. \tag{31}$$

Из сравнения (21) и (29) вытекает требование

$$A(s) = A^*(s),\ B_R(s) = B^*(s). \tag{32}$$

Согласно последнему равенству

$$m_R = \deg B_R(s) = \deg B^*(s) = M. \tag{33}$$

Предложение 2. Желаемая настройка (28) замкнутой САУ возможна лишь при соблюдении условия

$$\rho = 1. \blacksquare \tag{34}$$

Доказательство. Общее число параметров желаемой ПФ $W^*(s)$ с учетом соотношения (31) равно $N + M$. Следовательно, необходимое число настроечных параметров системы должно быть не меньше:

$$\widetilde{N} \geqslant N + M.$$

Подставляя сюда (23), (25), (33), получаем

$$\rho \leqslant 1.$$

Отсюда в силу (18) вытекает (34). □

Положим теперь, что выполняется условие (34). Тогда формула (22) приобретает вид

$$A(s) \equiv sA_R(s)H(s) + B_R(s).$$

Отсюда и из (32) следует равенство

$$sA_R(s)H(s) = A^*(s) - B^*(s). \tag{35}$$

Согласно (31) у многочлена $A^*(s) - B^*(s)$ свободный член равен нулю, поэтому многочлен разлагается на множители:

$$A^*(s) - B^*(s) = sC^*(s). \tag{36}$$

Подставляя данное выражение в (35), получим

$$A_R(s)H(s) = C^*(s). \tag{37}$$

Таким образом, многочлен $C^*(s)$ должен иметь делители степеней n_R и d в кольце многочленов с вещественными коэффициентами. Если это условие выполняется, то в результате факторизации (37) находим многочлены $A_R(s)$ и $H(s)$.

Ясно, что в общем случае многочлен $C^*(s)$ не будет иметь множители степеней n_R и d, т. е. факторизация (37) невозможна.

Предложение 3. При выполнении структурных условий

$$\rho = 1,\ N = d + 1,\ M \leqslant 1, \qquad (38)$$

задача синтеза САУ с эталонной передаточной функцией (28) всегда разрешима. ■

Доказательство. Пусть в эталонной ПФ

$$B^*(s) = b_1^* s + b_0^*,$$

причем имеет место равенство (31).

Сначала в соответствии с (32) находим

$$B_R(s) = B^*(s).$$

Далее из (36) находим многочлен $C^*(s)$. Учтем, что в случае (38) в соответствии с (23) $n_R = 0$, т. е. $A_R(s) \equiv 1$. Но тогда согласно (37)

$$H(s) = C^*(s). \ \square$$

Итак, при соблюдении условий предложения 3 возможно одновременно управлять всеми полюсами и одним нулем низкочастотной ПФ замкнутой системы.

Приведем прямые расчетные формулы для настроечных параметров САУ для случая $\rho = 1$:

1) $d = 1$, $N = 2$. Тогда

$$H(s) = s + h_0,\ B_R(s) = b_1 s + b_0,$$

$$\text{где } b_0 = a_0^*,\ b_1 = b_1^*,\ h_0 = a_1^* - b_1^*;$$

2) $d > 1$, $N = d + 1 > 2$. Тогда

$$b_0 = a_0^*,\ b_1 = b_1^*,\ h_0 = a_1^* - b_1^*,\ h_i = a_{i+1}^*,\ i = 1{:}\ N - 2.$$

Пример. Пусть $n = 2$ и объект управления описывается уравнением

$$\ddot{y}(t) + a_1^0 \dot{y}(t) + a_0^0 y(t) = \beta_0 u(t).$$

Считаем, что измеряются положение и скорость объекта: y и $\dot{y}$, т. е. $d = 1$. Положим $\rho = 1$. В эталонной ПФ (28):

$$A^*(s) = s^2 + a_1^* s + a_0^*,\ B^*(s) = a_0^*.$$

Тогда

$$H(s) = s + a_1^*,\ R(s) = \frac{a_0^*}{s}.$$

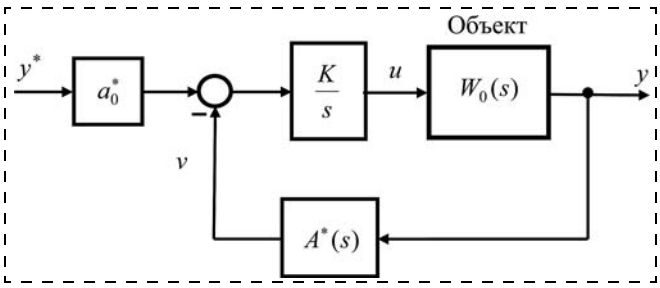

Рис. 3

Для сравнения приведем решение той же задачи синтеза системы управления с заданной эталонной ПФ, изложенное в монографии [11]. В данной работе предлагается закон управления

$$\dot{u}(t) = K[a_0^* y^*(t) - (\ddot{y}(t) + a_1^* \dot{y}(t) + a_0^* y(t))], \qquad (39)$$

причем по замыслу ее автора его реализует структурная схема САУ, приведенная на рис. 3.

Сравнивая схемы управления на рис. 2 и 3, подчеркнем их существенные отличия:

1) первая схема является двухконтурной, а вторая — одноконтурной;

2) в первой схеме явно разделены функции коррекции динамики объекта и достижения цели управления;

3) в первой схеме эффект большого коэффициента усиления используется для обеспечения робастной коррекции динамики объекта, а во второй — для формирования желаемой ПФ замкнутой системы;

4) во второй схеме звено в цепи обратной связи физически нереализуемо, поскольку требует информации об ускорении $\ddot{y}(t)$.

Последнее обстоятельство отмечается в работе [11], причем предлагается его обходить посредством следующей модификации закона управления (39):

$$u(t) = K\left[a_0^* \int_0^t (y^*(\tau) - y(\tau))d\tau - (\dot{y}(t) + a_1^* y(t))\right].$$

Замечания

1. В предлагаемой схеме робастной коррекции (см. рис. 1) передаточная функция корректирующего звена может быть задана в форме рациональной дроби:

$$H(s) = \frac{B_H(s)}{A_H(s)},$$

где $A_H(s)$ и $B_H(s)$ — многочлены. В этом случае получим следующую низкочастотную аппроксимацию передаточной функции скорректированного объекта:

$$\hat{V}(s) = \frac{A_H(s)}{B_H(s)}.$$

В итоге корни многочлена $A_H(s)$ станут передаточными нулями канала "уставка—выход" замкнутой САУ. Однако такое усложнение структуры корректирующего звена нерационально, поскольку эквивалентный результат с точки зрения расширения функциональных возможностей САУ всегда может быть достигнут посредством структурно-параметрической настройки регулятора.

2. Описанная схема робастной коррекции применима к нелинейным и нестационарным объектам при определенных ограничениях на их параметры. В этом случае сама коррекция приобретает дополнительный смысл — *линеаризация и стационаризация* каналов управления.

Список литературы

1. **Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Метод больших коэффициентов усиления и эффект локализации движений в задачах синтеза систем автоматического управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 2. С. 2—10.
2. **Мееров М. В.** О системах авторегулирования, устойчивых при сколь угодно большом коэффициенте усиления // Автоматика и телемеханика. 1947. № 4. С. 225—242.
3. **Хэддед Р. А.** Некоторые необычные, но не приспосабливающиеся системы / Приспосабливающиеся автоматические системы / Под ред. Э. Мишкина и Л. Брауна. М.: Изд-во ИЛ, 1963. С. 487—506.
4. **Поспелов Г. С.** О принципах построения некоторых видов самонастраивающихся систем автоматического управления // Самонастраивающиеся автоматические системы: Труды Междунар. симп. ИФАК. М.: Наука, 1964. С. 93—104.
5. **Первозванский А. А.** Курс теории автоматического управления. М.: Наука, 1986.
6. **Попов Е. П., Тимофеев А. В.** Принцип скоростного управления в задаче аналитического синтеза автоматов стабилизации // Докл. АН СССР. 1981. Т. 256, № 5. С. 1073—1076.
7. **Крутько П. Д.** Принцип управления по ускорению в задачах проектирования автоматических систем // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1987. № 6. С. 115—126.
8. **Востриков А. С.** Старшая производная и большие коэффициенты в задаче управления нелинейными нестационарными объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 5. С. 2—7.
9. **Чураков Е. П.** Оптимальные и адаптивные системы. М.: Машиностроение, 1987.
10. **Крутько П. Д.** Обратные задачи динамики управляемых систем: Линейные модели. М.: Наука, 1987.
11. **Крутько П. Д.** Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. Цикл лекций. М.: Машиностроение, 2004.
12. **Машиностроение.** Энциклопедия в 40 т. Т. 1—4. Автоматическое управление. Теория / Е. А. Федосов, А. А. Красовский, Е. П. Попов и др. Под общ. ред. Е. А. Федосова. М.: Машиностроение, 2000.
13. **Солодовников В. В., Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Анализ компенсационного подхода к синтезу систем управления // Известия вузов. Приборостроение. 1979. № 2. С. 27—32.
14. **Солодовников В. В., Филимонов Н. Б.** Динамическое качество систем автоматического регулирования. М.: МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1987.

Приложение

Асимптотические свойства решений дифференциальных уравнений с большим параметром

Рассмотрим однородное дифференциальное уравнение с вещественными коэффициентами:

$$\Delta(K, \mathrm{D})y(t) = 0, \qquad (\text{П1})$$

где

$$\Delta(K, \mathrm{D}) = A(\mathrm{D}) + KB(\mathrm{D}),$$

$$A(\mathrm{D}) = \mathrm{D}^n + \sum_{i=0}^{n-1} a_i \mathrm{D}^i,\ B(\mathrm{D}) = \beta(\mathrm{D}^m + \sum_{j=0}^{m-1} b_j^0 \mathrm{D}^j),$$

причем

$$m < n,\ \beta > 0,$$

а K — числовой параметр. Исследуем структуру его решений при $K \gg 1$.

Дифференциальному уравнению (П1) отвечает характеристический многочлен

$$\Delta(K, s) = A(s) + KB(s), \qquad (\text{П2})$$

где

$$A(s) = s^n + \sum_{i=0}^{n-1} a_i s^i,\ B(s) = \beta\left(s^m + \sum_{j=0}^{m-1} b_j s^j\right). \qquad (\text{П3})$$

Обсудим поведение корней многочлена (П2) при $K \gg 1$, опираясь на результаты работы авторов [1].

Выполним деление многочлена $A(s)$ на многочлен $B(s)$ и выделим частное $P(s)$ и остаток $Q(s)$:

$$A(s) = P(s)B(s) + Q(s), \qquad (\text{П4})$$

где

$$P(s) = \sum_{k=0}^{n-m} p_k s^k \qquad (\text{П5})$$

и $\deg Q(s) < m$.

Из (П3)—(П5) нетрудно вывести следующие равенства:

$$\beta p_{n-m} = 1,\ \beta(p_{n-m} b_{m-1} + p_{n-m-1}) = a_{n-1}.$$

Отсюда получаем

$$p_{n-m} = \frac{1}{\beta},\ p_{n-m-1} = \frac{a_{n-1} - b_{m-1}}{\beta}. \qquad (\text{П6})$$

Для многочлена (П2) при $K \gg 1$ справедлива аппроксимация

$$\Delta(K, s) \cong (P(s) + K)B(s).$$

Утверждение 1. При $K \to \infty$ множество корней многочлена (П2) разбивается на два подмножества: m корней являются конечными и совпадают с корнями многочлена $B(s)$; остальные $n - m$ корней совпадают с корнями уравнения

$$P(s) + K = 0, \qquad (\text{П7})$$

причем они неограниченно приближаются к прямолинейным асимптотам с углами наклона

$$(2k + 1)\pi/(n - m),\ k = 0{:}\ n - m - 1. \ \blacksquare$$

Утверждение 2. В случае $n - m = 2$ асимптотическое уравнение (П7) для бесконечно больших корней допускает следующее уточнение:

$$\frac{1}{\beta}(s - h)^2 + K = 0,$$

где

$$h = (b_{m-1} - a_{n-1})/2. \ \blacksquare$$

Таким образом, асимптоты годографа являются вертикальными лучами, выходящими из точки h вещественной оси s-плоскости.

Из утверждений 1 и 2 вытекает следующий критерий устойчивости многочлена (П2) при больших значениях параметра K.

Теорема. Если параметр K достаточно большой, то для устойчивости многочлена (П2) необходимо, чтобы был устойчивым многочлен $B(s)$. При соблюдении этого условия устойчивость данного многочлена имеет место в следующих случаях:

1) $n - m = 1$;

2) $n - m = 2$ и $h < 0$,

а его неустойчивость — в случаях:

3) $n - m \geqslant 3$;

4) $n - m = 2$ и $h > 0$. ■

Пусть выполняется условие 1) теоремы. Тогда в соответствии с (П6) и (П5) для многочлена (П2) при $K \gg 1$ справедлива аппроксимация

$$\Delta(K, s) \cong K(\tau s + 1)B(s), \qquad (П8)$$

где

$$\tau = \frac{1}{\beta K} \ll 1. \qquad (П9)$$

Таким образом, многочлен (П8) имеет корень $\lambda = -\frac{1}{\tau}$, и ему отвечают элементарные решения уравнения (П1) вида

$$\varphi(\lambda, t) = C \cdot \exp(\lambda t), \; C = \text{const} \neq 0. \qquad (П10)$$

Данные составляющие в общем решении $y(t)$ быстро затухают, и ими можно пренебречь. Это равносильно исключению малого параметра τ в структуре характеристического многочлена (П9).

Пусть выполняется условие 2) теоремы. Тогда в соответствии с (П6) и (П5) многочлен (П2) при $K \gg 1$ принимает вид

$$\Delta(K, s) \cong K[\tau(s - h)^2 + 1]B(s).$$

Теперь малому параметру τ отвечают комплексные корни характеристического уравнения

$$\lambda_{1,\,2} = h \pm j\frac{1}{\sqrt{\tau}}.$$

Данным корням отвечают высокочастотные затухающие колебания в структуре решений дифференциального уравнения (П1).

A. B. Filimonov, Professor, filimon_ab@mail.ru,
Moscow State Technical University Radio Engineering, Electronics and Automation,
N. B. Filimonov, Professor, nbfilimonov@mail.ru,
M. V. Lomonosov Moscow State University

Robust Correction in Control Systems with High Gain

Mechanism of robust correction in the systems with high gain is investigated. The questions of its application in the problems of synthesis of control systems with standard dynamics for objects with parametric uncertainty are discussed.

The new theoretical scheme of mechanism inclusion of high gain for the structure of control system is suggested. The robust correction of control object as a preliminary stage of solution of control problem is in its base. As a result the synthesized system has two-loop structure. The inner loop provides the robust correction of object, and the external one responds for the achievement of control objective. Such approach seems to the authors more logical. It divides the functions of correction and control. As a result in going from input control problem with uncertainty factors to the control problem by corrected object the given factors are eliminated. That approach is applicable to more wide class of problems of robust control.

Keywords: *parametric uncertainty, high gain, the scheme of robust correction, synthesis of control systems, standard dynamics*

References

1. **Filimonov A. B., Filimonov N. B.** Metod bol'shih kojefficientov usilenija i jeffekt lokalizacii dvizhenij v zadachah sinteza sistem avtomaticheskogo upravlenija. *Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie.* 2009. N. 2. P. 2—10.

2. **Meerov M. V.** O sistemah avtoregulirovanija, ustojchivyh pri skol' ugodno bol'shom kojefficiente usilenija. *Avtomatika i telemehanika.* 1947. N. 4. P. 225—242.

3. **Hjedded R. A.** Nekotorye neobychnye, no ne prisposablivajushhiesja sistemy. *Prisposablivajushhiesja avtomaticheskie sistemy.* Pod red. Je. Mishkina i L. Brauna. M.: Izd-vo IL, 1963. P. 487—506.

4. **Pospelov G. S.** O principah postroenija nekotoryh vidov samonastraivajushhihsja sistem avtomaticheskogo upravlenija. *Samonastraivajushhiesja avtomaticheskie sistemy: Trudy Mezhdunar. simp. IFAK.* M.: Nauka, 1964. P. 93—104.

5. **Pervozvanskij A. A.** Kurs teorii avtomaticheskogo upravlenija. M.: Nauka, 1986.

6. **Popov E. P., Timofeev A. V.** Princip skorostnogo upravlenija v zadache analiticheskogo sinteza avtomatov stabilizacii. *Dokl. AN SSSR.* 1981. V. 256, N. 5. P. 1073—1076.

7. **Krut'ko P. D.** Princip upravlenija po uskoreniju v zadachah proektirovanija avtomaticheskih system. *Izv. AN SSSR. Tehnicheskaja kibernetika.* 1987. N. 6. P. 115—126.

8. **Vostrikov A. S.** Starshaja proizvodnaja i bol'shie kojefficienty v zadache upravlenija nelinejnymi nestacionarnymi ob'ektami. *Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie.* 2008. N. 5. P. 2—7.

9. **Churakov E. P.** Optimal'nye i adaptivnye sistemy. M.: Mashinostroenie, 1987.

10. **Krut'ko P. D.** Obratnye zadachi dinamiki upravljaemyh sistem: Linejnye modeli. M.: Nauka, 1987.

11. **Krut'ko P. D.** Obratnye zadachi dinamiki v teorii avtomaticheskogo upravlenija. Cikl lekcij. M.: Mashinostroenie, 2004.

12. **Mashinostroenie.** Jenciklopedija v 40 t. T. 1—4. Avtomaticcheskoe upravlenie. Teorija. E. A. Fedosov, A. A. Krasovskij, E. P. Popov i dr. Pod obshh. red. E. A. Fedosova. M.: Mashinostroenie, 2000.

13. **Solodovnikov V. V., Filimonov A. B., Filimonov N. B.** Analiz kompensacionnogo podhoda к sintezu sistem upravlenija. Izvestija vuzov. Priborostroenie. 1979. N. 2. P. 27—32.

14. **Solodovnikov V. V., Filimonov N. B.** Dinamicheskoe kachestvo sistem avtomaticheskogo regulirovanija. M.: MVTU im. N. Je. Baumana, 1987.

УДК 519.711

Н. Н. Карабутов, д-р техн. наук, проф., **В. М. Лохин,** д-р техн. наук, проф.,
С. В. Манько, д-р техн. наук, проф., cpd@mirea.ru,
М. П. Романов, д-р техн. наук, проф., m_romanov@mirea.ru,
Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики

Модели адаптивного управления на базе ассоциативной памяти

На основе анализа и классификации факторов неопределенности, действующих на систему автоматического управления, рассматриваются два подхода к построению адаптивных регуляторов и систем на базе ассоциативной памяти.

Ключевые слова: *адаптация, управление, интеллект, ассоциативная память*

Введение

Появление новых и усложнение существующих технологических процессов, сложных машин и механизмов приводит к значительному повышению требований к качеству управления, что особенно важно при создании систем, работающих в условиях неопределенности.

Известные методы адаптивного управления в быстродействующих системах как гражданского, так и специального назначения широкого применения не нашли. Связано это, в первую очередь, со сложностью адаптивных алгоритмов, которые требуют больших вычислительных мощностей, могут приводить к появлению запаздывания в контуре системы и к соответствующему ухудшению ее динамики.

В последние годы исследователи в области адаптивного управления вплотную подошли к возможности реализации идей, высказанных академиком Я. З. Цыпкиным в его известном докладе "Адаптация, обучение и самообучение в автоматических системах" на 3-м Всесоюзном совещании по автоматическому управлению (Одесса, сентябрь 1965 г.), а затем развитых в книге [1].

С позиции сегодняшнего дня, обобщая как перспективные предложения академика Я. З. Цыпкина, связанные с применением технологий обучения и самообучения в области адаптивного управления, так и собственное понимание состояния (математическое и техническое) той дисциплины, которая фундаментально занимается проблемами обучения и самообучения (имея в виду интеллектуальные технологии обработки информации и управления), можно с полной уверенностью говорить о новом перспективном направлении в решении широкого комплекса задач адаптивного управления — о создании адаптивных систем на базе интеллектуальных технологий. Это тем более важно и актуально, поскольку на фоне активного совершенствования техники существенно возрастает совокупность факторов неопределенности, действующих на систему и требующих активной и быстродействующей адаптации к изменяющимся условиям функционирования.

К настоящему времени известно достаточно много работ, в которых показана возможность и перспективность использования интеллектуальных технологий для организации управления сложными динамическими объектами, функционирующими в условиях неопределенности, когда параметры системы и окружающей среды существенным образом изменяются. Достаточно всесторонне исследованы технологии экспертных систем, нейронных сетей и нечеткого логического вывода [2—5].

На фоне данных исследований незаслуженно мало внимания уделено технологии ассоциативной памяти. Данная технология, которая получила весьма широкое распространение в вычислительной технике, является на сегодняшний день одним из альтернативных подходов к созданию быстродействующих адаптивных систем управления. Эта технология, с одной стороны, базируется на механизмах ассоциативной записи и восстановления информации, позволяющих осуществлять доступ к данным с высокой скоростью (этот аспект применения традиционно исследуется в области вычислительной техники). С другой стороны, технология ассоциативной памяти позволяет на основе ассоциативных связей проводить классификацию состояния системы на качественном уровне и фор-

мировать управления, соответствующие текущему состоянию системы и заданному критерию качества управления. Этот практически не изученный аспект применения ассоциативной памяти и исследуется в данной статье.

Концепция применения ассоциативной памяти в системах адаптивного управления

Обычно при управлении сложными динамическими объектами в условиях неопределенности для реализации адаптивного управления требуется проводить большой объем вычислений, что приводит к известным сложностям. В рамках развиваемого подхода предлагается вычисления выполнить заранее и записать в память. Понятно, что извлечение из памяти готового результата значительно быстрее, чем его вычисление. Однако поместить в память все возможные решения практически невозможно из-за большого объема требуемой памяти, кроме того, поиск решений будет очень долгим.

Ассоциативная же память запоминает связанные между собой данные и выбирает не точное значение, а наиболее близкое. Например, в ассоциативной памяти могут быть запомнены точки N-мерного пространства. Тогда по некоторым координатам из памяти можно извлечь точку, лежащую наиболее близко к заданной. При этом степень близости характеризуется минимальным расстоянием

$$r = \sqrt{\sum_i (x_i - x_i^0)^2}, \qquad (1)$$

где x_i^0 — i-я координата точного значения; x_i — i-я координата наиболее близкого к точному значения.

С одной стороны, поскольку в памяти записаны не все данные, а только некоторые, характеризующие определенные множества близких значений, то применение ассоциативной памяти позволяет существенно ограничить ее объем и значительно повысить быстродействие поиска нужной информации. С другой стороны, так как в таких системах управления из памяти выбираются структура и параметры регуляторов или управляющие воздействия, то возникает сложная проблема определения размеров множеств значений параметров, которые в силу их дискретного представления в памяти не приводили бы к нарушению устойчивости и ухудшению качества управления.

В адаптивных системах управления для обеспечения связанности информации предлагается ассоциативную память обучать на входной вектор, состоящий из двух частей. Первая часть содержит информацию с выходов регулятора и датчиков обратных связей, а вторая — параметры регулятора или значение управляющих воздействий, обеспечивающих требуемые критерии качества. В режиме управления по первой части вектора восстанавливается вторая. Таким образом, осуществляется оперативная идентификация, которая позволяет снять проблему неполной информации за счет отнесения состояния системы к одному из заранее известных классов, для которых в памяти заложены решения в виде структур и параметров регуляторов или непосредственно в виде управляющих воздействий.

Предсказуемая и непредсказуемая неопределенности

Достаточно подробный анализ факторов неопределенности, действующих на различных уровнях иерархии управления сложным динамическим объектом (исполнительном, тактическом, стратегическом и информационно-измерительном), был проведен в работе [2]. В рамках данной статьи делается попытка формализованного описания и классификации неопределенностей для последующего анализа их влияния на систему управления.

В общем случае математическую модель многомерной динамической системы можно представить в виде совокупности нелинейного нестационарного дифференциального уравнения объекта управления

$$\dot{x} = f(x, u, t) \qquad (2)$$

и многомерного регулятора, закон управления которого при условии выполнения выбранного критерия качества

$$\lim_{K \to \infty} Q(x, t) = 0 \qquad (3)$$

будет иметь вид [6]

$$u(t) = U(u(t), u^0(t), \Theta(t), t), \qquad (4)$$

где $x \in R^n$ — вектор состояния объекта; $u \in R^m$ — вектор управляющих воздействий; $m < n$; t — время; $Q(x, t)$ — неотрицательная непрерывно дифференцируемая по x, t целевая функция; $u^0(t) \in R^m$ — программное управление; $\Theta(t) \in R^m$ — вектор настраиваемых параметров.

Описание динамических систем с помощью уравнений подобного вида широко использовалось А. М. Ляпуновым, А. А. Андроновым, А. И. Лурье, А. М. Летовым, А. А. Вороновым и другими авторами для исследования систем автоматического управления [7].

В процессе управления для вычисления вектора управляющих воздействий в соответствии с выражением (4) необходимо формировать вектор настраиваемых параметров $\Theta(t)$, который зависит от вектора состояния объекта и вектора программного управления

$$\Theta(t) = \Theta\{x(t), u^0(t), t\}. \qquad (5)$$

Однако при формировании $u(t)$ и $\Theta(t)$ в реальных системах используется не информация о текущем состоянии системы, а некоторая оценка на основании измеренной и вычисленной информации о векторе состояния объекта;

$$x(t) = x^0(t) + \xi(x^0(t), u^0(t), t) + \eta^*(t), \qquad (6)$$

где $x^0(t)$ — вектор невозмущенного состояния объекта; $\xi(x^0(t), u^0(t), t)$ — вектор отклонений от $x^0(t)$ при действии внешних неконтролируемых возмущений (полагаем, что действие измеряемых возмущений можно учесть в векторе управляющих воздействий и программном управлении); $\eta^*(t)$ — вектор отклонений состояния объекта, обусловленный ошибками измерений и вычислений. При этом с учетом (5) вектор настраиваемых параметров будет вычисляться следующим образом:

$$\Theta(t) = \Theta\{x^0(t) + \xi(x^0(t), u^0(t), t), u^0(t), t\} + \\ + \eta(x^0(t), u^0(t), t), \qquad (7)$$

где $\eta(x^0(t), u^0(t), t)$ — вектор отклонения настроек параметров, обусловленный ошибками измерений и вычислений.

Таким образом, при управлении сложными динамическими объектами в реальных условиях возникает неопределенность, связанная с формированием $\Theta(t)$ по измеряемой и априорной информации. Представление $\Theta(t)$ в виде (7) позволяет проанализировать источники неопределенности. К ним можно отнести:

- влияние внешних неконтролируемых возмущений, которое приводит к ошибке вычисления вектора настраиваемых параметров регулятора;
- ошибки в формировании векторов $u^0(t)$ и $x^0(t)$, вызванные энергетическими ограничениями исполнительных устройств, которые приводят к существенным погрешностям при формировании $\Theta(t)$;
- ошибки вычисления $\Theta(t)$, связанные с неучтенным (из-за неполной информации) влиянием перекрестных связей между координатами вектора $x(t)$;
- неточности формирования вектора $\Theta(t)$, вызванные ошибками измерений и вычислений, которые описываются вектором $\eta(x^0(t), u^0(t), t)$;
- методические ошибки в вычислении $\Theta(t)$, которые можно компенсировать обучением [6, 8, 9].

Анализ источников неопределенности позволяет разделить неопределенность на два вида: предсказуемую [10] и непредсказуемую.

Предсказуемая неопределенность имеет место в том случае, когда известна априорная информация о характере поведения вектора $x^0(t)$, т. е. закон изменения управляемых координат. (Например, траектории движения рабочего органа робота, уравнения движения по которым известны, можно аппроксимировать конечным набором сплайнов; при этом неопределенность будет заключаться только в выборе соответствующего сплайна.). Непредсказуемая неопределенность имеет место, когда такой информации нет. Так, например, для сборочных роботов, которые работают в рамках определенного набора технологических движений, характерных для сборочного роботизированного процесса, неопределенность может быть классифицирована как предсказуемая. Роботы, предназначенные для экстремальных сред, в основном работают в условиях непредсказуемой неопределенности, так как траекторию их движения нельзя заранее предсказать.

Модели адаптивного управления

Предложенная классификация неопределенностей является основой для рассмотрения двух принципиальных подходов к построению систем адаптивного управления на базе ассоциативной памяти. Предварительно заметим, что для эффективной работы ассоциативной памяти необходимо осуществлять преобразование и сжатие входной и выходной информации. Эти функции предлагается возложить на рецепторную и эффекторную системы.

Первый подход иллюстрирует рис. 1, на котором представлена функциональная схема адаптивной системы управления, состоящая из традиционного контура управления объектом и контура самонастройки регулятора. В контур самонастройки регулятора входят: рецепторная система, которая осу-

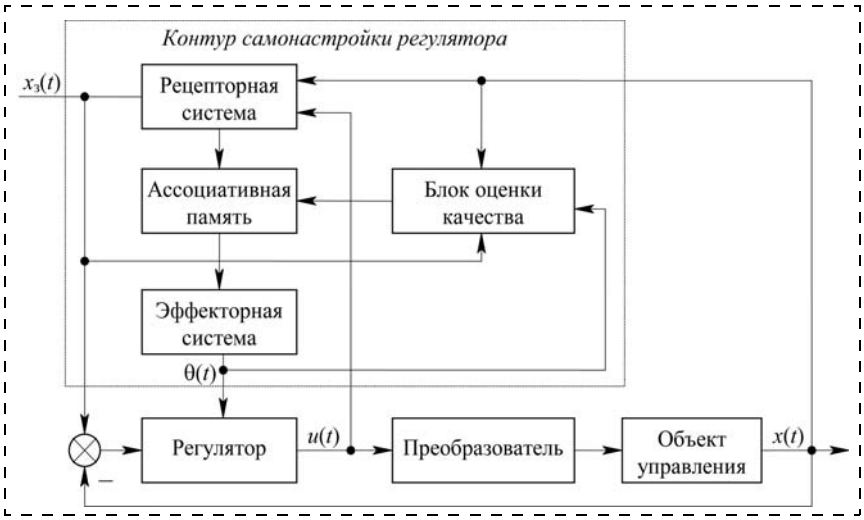

Рис. 1. Функциональная схема адаптивной системы управления с контуром самонастройки регулятора на базе ассоциативной памяти

ществляет нормировку, сжатие и первичный анализ входной информации; ассоциативная память; эффекторная система, декодирующая информацию с выхода ассоциативной памяти и управляющая параметрами регулятора; блок оценки качества. На вход рецепторной системы поступает вектор состояния объекта $x(t)$, содержащий информацию, соответствующую сигналу обратной связи, входному задающему воздействию и выходному сигналу регулятора (4). На выходе эффекторной системы формируется вектор, содержащий параметры регулятора (5).

Учет внешних неизмеряемых возмущений происходит на этапе оперативной идентификации ассоциативной памятью, которая расценивает их как изменение динамических характеристик объекта управления. Наличие блока оценки качества управления позволяет реализовать самообучение ассоциативной памяти. Кроме того, он формирует сигнал разрешения записи в ассоциативную память.

На этапе обучения блоку ассоциативной памяти в качестве входного вектора предъявляется набор областей параметров объекта и соответствующие этим областям настройки регулятора, при которых удовлетворяется выбранный критерий качества (3).

В процессе управления ассоциативная память классифицирует входные векторы и формирует соответствующие параметры регулятора.

В качестве примера реализации такого подхода рассмотрим адаптивную систему управления приводом постоянного тока, в которой с помощью ассоциативной памяти подстраиваются параметры регулятора. Здесь неопределенность выражается в изменении момента инерции. Эффективность работы регулятора с ассоциативной памятью будем оценивать по сравнению с традиционным ПИД регулятором, а сравнение будем проводить по качеству управления при изменении параметров объекта управления как в режиме переходного процесса, так и в режиме слежения при изменении момента инерции на валу электродвигателя.

Структурная схема адаптивной системы управления электропривода, в котором самонастройка регулятора осуществляется на базе ассоциативной памяти, представлена на рис. 2. Здесь передаточная функция преобразователя равна единице, а блок оценки качества, рецепторная и эффекторная системы включены в состав ассоциативной памяти.

Подстройка параметров регулятора с комплексным коэффициентом передачи $W^*_{\text{рег}}$ осуществляется ассоциативной памятью по методу обратных задач динамики [11]. В контуре самонастройки выполняется идентификация электромеханической постоянной времени электродвигателя

$$T_{\text{м}} = \frac{JR_{\text{я}}}{k_e k_m},$$

где k_e, k_m — коэффициенты пропорциональности ЭДС вращения и момента; J — момент инерции, приведенный к валу исполнительного двигателя; $R_{\text{я}}$ — активное сопротивление якоря электродвигателя.

Из переходного процесса угловой скорости вращения робота $\omega(t)$, представленного на рис. 3, *а*, видно хорошее качество управления в системах с ПИД регулятором и с ассоциативной памятью (переходные процессы совпадают) при передаточной функции преобразователя $W_{\text{преоб}} = 1$ и следующих параметрах двигателя постоянного тока: $T_{\text{м}} = 0{,}1$ с, $T = 0{,}005$ с,

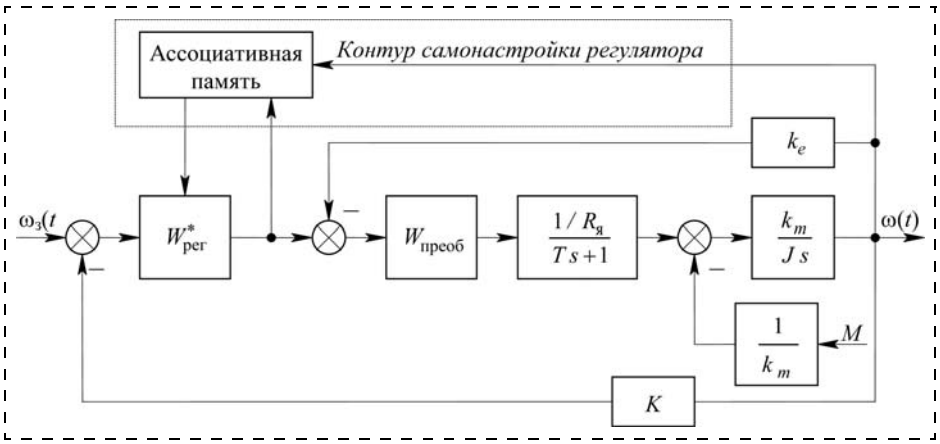

Рис. 2. Структурная схема адаптивной системы управления электропривода с контуром самонастройки регулятора на базе ассоциативной памяти

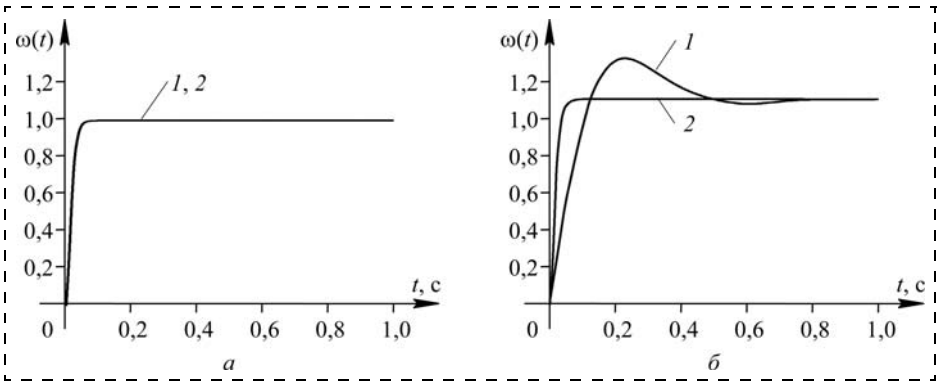

Рис. 3. Переходные процессы в системах управления с ПИД регулятором (*1*) и с ассоциативной памятью (*2*) при: $T_{\text{м}}$ = 0,1 с, $\omega_з$ = 1 рад/с (*а*); $T_{\text{м}}$ = 0,5 с, $\omega_з$ = 1 рад/с (*б*)

k_e = 4 В·с/рад, $R_я$ = 4 Ом, k_m/J = 10 рад/с·А, K = 0,05, M = 0, ω_3 = 1 рад/с.

На рис. 3, *б* представлены переходные процессы в системе с ПИД регулятором и с ассоциативной памятью при $T_м$ = 0,5 с. Переходный процесс *2* в системе с ассоциативной памятью не изменился, так как была проведена настройка регулятора по результатам идентификации параметров объекта управления, а в переходном процессе *1* в системе с ПИД регулятором появилось перерегулирование.

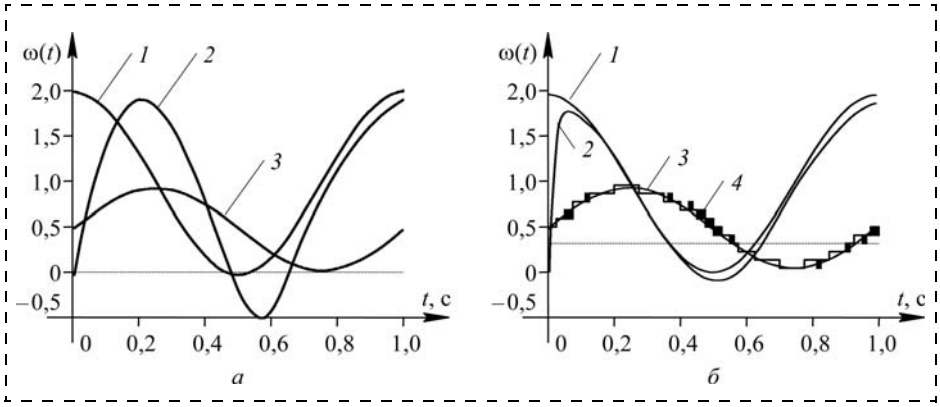

Рис. 4. Переходные процессы в системах управления с ПИД регулятором (*а*) и с ассоциативной памятью (*б*) в режиме слежения при $T_м$ = 0,5(1 + sin(2ω*t*)), ω_3 = 1 + cos(2ω*t*)

Рис. 5. Система управления с адаптивным регулятором на базе ассоциативной памяти

На рис. 4 представлены процессы слежения при изменении входного сигнала *1* и механической постоянной времени *3* по гармоническому закону, что имеет место в приводах манипуляционных роботов с вертикально- и горизонтально-ангулярными кинематическими схемами. Как видно из временных диаграмм, качество слежения (выходной сигнал *2*) в адаптивной системе с ассоциативной памятью гораздо лучше. Следует отметить, что идентификация механической постоянной времени *4* выполнялась дискретно с квантованием по уровню, так как ассоциативная память реализована на модифицированной сети нейроноподобных элементов типа Хопфилда [12]. Размерность нейроноподобной сети — 100 элементов.

В предлагаемом устройстве ассоциативная память как элемент системы автоматического управления вносит специфическое квантование, которое будем называть "квантованием по параметру". В связи с этим система с ассоциативной памятью в общей классификации САУ может быть отнесена к новому классу нелинейных систем автоматического управления — системам с квантованием по параметру. Тем не менее, задача синтеза может быть сформулирована в классической постановке, когда требуется синтезировать параметры регулятора, обеспечивающего устойчивость и требуемое качество управления. Говоря о проблеме устойчивости, мы подразумеваем как устойчивость положения равновесия, так и устойчивость процессов, вызванных изменениями параметров системы, входных и возмущающих воздействий. Данная задача требует отдельного теоретического обоснования, ее решение выходит за пределы данной статьи. Вместе с тем, предварительные теоретические исследования и эксперименты показали возможность ее решения и позволили получить методику настройки регуляторов с ассоциативной памятью. В экспериментальных исследованиях эффективность работы предложенной адаптивной системы управления проверяли в широком диапазоне изменения параметров объекта, входных и возмущающих воздействий.

Сравнительный анализ полученных результатов показывает, что для объектов с быстро меняющимися параметрами адаптивная система с ассоциативной памятью имеет не только хорошие показатели качества управления, но и существенные преимущества по сравнению с традиционными системами, что позволяет использовать ее в многосвязных системах управления для реализации параметрической развязки.

Второй подход к построению адаптивных систем управления иллюстрирует рис. 5. Здесь ассоциативная память, рецепторная и эффекторная системы помещаются непосредственно в контур управления в качестве адаптивного регулятора. На вход рецепторной системы поступают сигналы от блока оценки качества и ошибки рассогласования между входным воздействием $x_3(t)$ и сигналом обратной связи $x(t)$. Этот же вектор ошибки поступает и на вход блока оценки качества.

В такой системе формирование знаний в ассоциативной памяти на этапе обучения осуществляется оператором. Ассоциативная память записывает набор входных векторов сигналов от датчиков и соответствующих им управляющих воздействий, выполненных оператором. После обучения ассоциативной памяти на всевозможные ситуации она заменяет человека. По входному вектору, содержащему информацию о состоянии объекта и входного воздействия, ассоциативная память формирует управляющее воздействие на объект. Задача качественного управления сводится к обучению на наиболее полный набор возможных состояний объекта управления. Выполнение критерия качества является разрешением для записи информации в ассоциативную память при обучении.

Одним из первых примеров реализации такой системы может служить разработанный в манчестерском университете подвижный робот FortyTwo, который является полностью автономным, не подключен к внешним источникам питания и к управляющим компьютерам. Высота робота — 75 см, масса — 60 кг, управление осуществляется от контроллера на базе 486-процессора. Он оснащен ультразвуковыми датчиками расстояния (дальность действия до 10,6 м), инфракрасными датчиками (чувствительность до 60 см), оптическими датчиками, цифровыми датчиками положения и визуальным датчиком (одноцветной фотокамерой с разрешающей способностью 492 × 512 пикселей и фокусным расстоянием 12,5 мм).

Система управления построена так, что ассоциативная память, выполненная на искусственной нейросети (рис. 6), представляет собой основной компонент контроллера, который связывает входные сигналы датчика с соответствующими управляющими сигналами на двигатели. При обучении ассоциативная память связывает информацию от датчиков с управляющими действиями оператора. Программирование робота осуществляется методом непосредственного обучения с последующей записью действий оператора в ассоциативную память (т. е. поведение робота — результат обучения, а не программирования). После обучения FortyTwo становится способным выполнить требуемую задачу автономно.

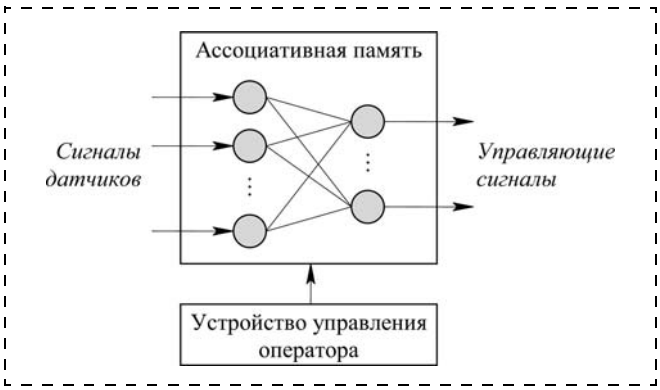

Рис. 6. Структура системы управления подвижным роботом FortyTwo

Заключение

На основе анализа источников неопределенностей и их классификации предложено два подхода к построению адаптивных систем управления с ассоциативной памятью:

- системы управления с самонастройкой регулятора более эффективно работают в условиях предсказуемой неопределенности, когда при известных типах движения динамической системы можно заранее определять структуру регулятора, наиболее полно удовлетворяющую всем возможным движениям, а при управлении проводить только параметрическую настройку;
- схема с регулятором на основе ассоциативной памяти лучше подходит для управления в условиях непредсказуемой неопределенности, так как в ней непосредственно осуществляется формирование управляющих воздействий, обеспечивающее адаптивную подстройку под изменение как структуры, так и параметров объекта.

Достаточно очевидно, что развитие технологии ассоциативной памяти позволит решить задачу адаптации не только на исполнительном, но и на тактическом и стратегическом уровнях иерархии интеллектуального управления. При этом необходимо рассмотреть комплекс первоочередных вопросов: какие из известных типов ассоциативной памяти целесообразно использовать в системах управления, какие принципы построения заложить в адаптивную интеллектуальную систему с ассоциативной памятью?

Главное преимущество ассоциативной памяти — простота как программной, так и аппаратной реализации (что крайне важно с учетом проблемы импортозамещения), которая обеспечит высокое быстродействие, определяемое временем обращения к отдельной ячейке памяти.

Список литературы

1. **Цыпкин Я. З.** Адаптация и обучение в автоматических системах. М.: Наука, 1968.

2. **Автоматизации** синтеза и обучения интеллектуальных систем автоматического управления / Отв. ред. И. М. Макаров, В. М. Лохин; Отд. информ. технологий и вычисл. систем РАН. М.: Наука, 2009.

3. **Пегат А.** Нечеткое моделирование и управление. М.: БИНОМ, 2013.

4. **Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П.** Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. М.: Наука, 2006.

5. **Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия — Телеком, 2006.

6. **Бурдаков С. Ф., Смирнова Н. А.** Обучаемое управление движением гибкого робота // VI НТК "Робототехника для экстремальных условий". СПб., 1996. С. 154—162.

7. **Воронов А. А.** Введение в динамику сложных управляемых систем. М.: Наука, 1985.

8. **Arimoto S.** Learning control theory for robotic motion // Int. J. of Adaptive Control and Signal Processing. 1990. N. 4. P. 543—564.

9. **Wang C. H., Zhaang F. E.** A knowledge-based iterative learning controller and its application to the control of robot manipulators // Symposium on robot control. Part 1. Vienna Austria, September 16—18, 1991. P. 279—282.

10. **Ширяев В. И.** Синтез управления линейными системами при неполной информации // Изв. РАН Техн. кибернетика. 1994. № 3. С. 229—237.

11. **Крутько П. Д.** Обратные задачи динамики управляемых систем: Линейные модели. М.: Наука, 1987.

12. **Уоссерман Ф.** Нейрокомпьютерная техника. Теория и практика. М.: Мир, 1992.

N. N. Karabutov, Professor, **V. M. Lokhin,** Professor,
S. V. Manko, Professor, cpd@mirea.ru, **M. P. Romanov,** Professor, m_romanov@mirea.ru,
Moscow State Technical University Radio Engineering, Electronics and Automation

Models of Adaptive Control on the Base of Associative Memory

Improvement of technological processes for development of new generation of the automated equipment for difficult operations performance leads to substantial increase of requirements to quality indicators of control systems. Implementation of these requirements for systems, functioning in the uncertainty conditions, is interfaced to considerable difficulties and demands development of new approaches, especially for high-speed control systems.

Known methods of adaptive control in high-speed systems, didn't find wide application. It is connected, first of all, with complexity of adaptive algorithms, which demand large computing capacities, can lead to emergence of delay in a contour of system and to the corresponding deterioration of its dynamics.

In this article the intelligent technologies application for creation of adaptive control models is investigated. Against a large number of the publications devoted to adaptive control on the basis of application of neural networks, fuzzy logic, and also expert systems, obviously not enough attention is given to associative memory technology, which main advantage is simplicity of both program, and hardware realization and, respectively, the high speed functioning, determined by time of the appeal to a separate memory cell.

In article on the basis of the analysis and classification of the uncertainty factors, operating on automatic control system, two approaches to creation of adaptive control models with associative memory are offered and investigated.

Keywords: *artificial intelligence, control, adaptation to uncertainty conditions, associative memory, absolute stability, Lyapunov's second method, dynamics of intelligent control systems, expert regulator*

References

1. **Tsypkin Ya. Z.** Adaptatsiya i obuchenie v avtomaticheskikh sistemakh. M.: Nauka, 1968.

2. **Avtomatizatsii** sinteza i obucheniya intellektual'nykh sistem avtomaticheskogo upravleniya / Otv. red. I. M. Makarov, V. M. Lokhin; Otd. inform. tekhnologiy i vychisl. sistem RAN. M.: Nauka, 2009.

3. **Pegat A.** Nechetkoe modelirovanie i upravlenie. M.: BINOM, 2013.

4. **Makarov I. M., Lokhin V. M., Man'ko S. V., Romanov M. P.** Iskusstvennyy intellekt i intellektual'nye sistemy upravleniya. M.: Nauka, 2006.

5. **Rutkovskaya D., Pilin'skiy M., Rutkovskiy L.** Neyronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy. M.: Goryachaya liniya — Telekom, 2006.

6. **Burdakov S. F., Smirnova N. A.** Obuchaemoe upravlenie dvizheniem gibkogo robota. *VI NTK "Robototekhnika dlya ekstremal'nykh usloviy".* SPb., 1996. P. 154—162.

7. **Voronov A. A.** Vvedenie v dinamiku slozhnykh upravlyaemykh sistem. M.: Nauka, 1985.

8. **Arimoto S.** Learning control theory for robotic motion. *Int. J. of Adaptive Control and Signal Processing.* 1990. N. 4. P. 543—564.

9. **Wang C. H., Zhaang F. E.** A knowledge-based iterative learning controller and its application to the control of robot manipulators. *Symposium on robot control. Part 1.* Vienna Austria, September 16—18, 1991. P. 279—282.

10. **Shiryaev V. I.** Sintez upravleniya lineynymi sistemami pri nepolnoy informatsii. *Izv. RAN Tekhn. kibernetika.* 1994. N. 3. P. 229—237.

11. **Krut'ko P. D.** Obratnye zadachi dinamiki upravlyaemykh sistem: Lineynye modeli. M.: Nauka, 1987.

12. **Uosserman F.** Neyrokomp'yuternaya tekhnika. Teoriya i praktika. M.: Mir, 1992.

УДК 531.36

А. Ю. Александров, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой, alex43102006@yandex.ru,
Е. Б. Александрова, канд. физ.-мат. наук, доц., star1460@yandex.ru,
Санкт-Петербургский государственный университет

Одноосная стабилизация твердого тела при наличии запаздывания в обратной связи[1]

Рассматривается твердое тело, вращающееся вокруг неподвижной точки под действием момента диссипативных сил и управляющего момента. Предполагается, что имеется запаздывание в канале обратной связи, представляющее собой непрерывную ограниченную и неотрицательную функцию времени. Предлагаются два способа построения управлений, обеспечивающих одноосную стабилизацию тела, и определяются условия, при выполнении которых запаздывание не нарушает асимптотическую устойчивость заданного положения равновесия.

Ключевые слова: *твердое тело, одноосная стабилизация, асимптотическая устойчивость, запаздывание, функции Ляпунова*

Введение

Анализ устойчивости решений нелинейных систем дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом является одной из актуальных проблем современной теории управления. Системы такого рода широко применяются при моделировании различных процессов в механике, электродинамике, экономике, химии, биологии, а также в ряде других областей (см., например, работы [1—5] и цитируемую там литературу).

Следует отметить, что любая система автоматического регулирования в той или иной степени представляет собой систему с запаздыванием. Это обусловлено тем, что управления формируются по принципу обратной связи на основе доступной измерению информации. Поскольку измерительное устройство на объекте управления и управляющее устройство, где формируется управляющий сигнал, могут быть разнесены в пространстве на значительное расстояние, то возникает запаздывание в канале обратной связи, которое может быть не малым и может меняться в процессе функционирования системы [1, 2, 6, 7].

При исследовании систем дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом требуется учитывать влияние запаздывания на устойчивость их решений. Известно, что введение даже малого запаздывания может привести к потере устойчивости [8]. Поэтому актуальной является задача нахождения предельных значений запаздываний, при которых сохраняется устойчивость программных движений.

Основным методом анализа устойчивости нелинейных систем является прямой метод Ляпунова. Для систем с запаздывающим аргументом при его применении используются или функционалы Ляпунова — Красовского [2, 3, 9], или функции Ляпунова и подход Б. С. Разумихина [8—10]. С помощью этих подходов были получены условия устойчивости решений для широкого класса систем (см. работы [1—11] и цитируемую там литературу). Однако следует отметить, что до сих пор не существует общих конструктивных способов нахождения функций или функционалов Ляпунова для нелинейных систем.

В данной статье рассматривается твердое тело, вращающееся вокруг неподвижной точки под действием момента диссипативных сил и управляющего момента. Требуется выбрать управление, обеспечивающее одноосную стабилизацию тела. При этом предполагается, что имеется запаздывание в канале обратной связи, которое представляет собой непрерывную ограниченную и неотрицательную функцию времени.

В случае отсутствия запаздывания указанная задача исследовалась в работах [12, 13]. Были предложены способы построения линейных управлений, стабилизирующих заданное положение равновесия твердого тела. В данной статье рассматриваются как линейный, так и существенно нелинейный управляющий моменты. С помощью метода функций Ляпунова и подхода Разумихина определяются условия, при выполнении которых запаздывание не нарушает асимптотическую устойчивость положения равновесия.

[1] Работа частично поддержана РФФИ (проекты № 13-01-00376 и № 13-08-00948).

1. Постановка задачи

Рассмотрим твердое тело, вращающееся вокруг неподвижной точки O, расположенной в его центре инерции. Предположим, что с телом связаны оси $Oxyz$, которые служат главными центральными осями этого тела. Уравнение вращательного движения под действием момента $\mathbf{M}$ имеет вид

$$\mathbf{\Theta}\dot{\boldsymbol{\omega}}(t) + \boldsymbol{\omega}(t) \times \mathbf{\Theta}\boldsymbol{\omega}(t) = \mathbf{M}, \tag{1}$$

где $\boldsymbol{\omega}$ — вектор угловой скорости; $\mathbf{\Theta} = \mathrm{diag}\{A, B, C\}$ — тензор инерции тела; A, B, C — главные центральные моменты инерции [14].

Пусть имеются два орта $\mathbf{r}$ и $\mathbf{s}$. Вектор $\mathbf{s}$ будем считать неизменным в абсолютном пространстве, вектор $\mathbf{r}$ — постоянным в твердом теле. Тогда вектор $\mathbf{s}$ вращается по отношению к системе $Oxyz$ с угловой скоростью $-\boldsymbol{\omega}$. Следовательно,

$$\dot{\mathbf{s}}(t) = -\boldsymbol{\omega}(t) \times \mathbf{s}(t). \tag{2}$$

Предположим, что момент $\mathbf{M}$ складывается из момента сил сопротивления $\mathbf{M}_c$ и управляющего момента $\mathbf{M}_u$: $\mathbf{M} = \mathbf{M}_c + \mathbf{M}_u$. Момент сил сопротивления будем считать заданным формулой

$$\mathbf{M}_c = -h\mathbf{D}\boldsymbol{\omega}(t). \tag{3}$$

Здесь $\mathbf{D}$ — постоянная симметрическая положительно определенная матрица; h — положительный параметр.

Управляющий момент $\mathbf{M}_u$ требуется выбрать по принципу обратной связи ($\mathbf{M}_u = \mathbf{M}_u(\boldsymbol{\omega}(t), \mathbf{s}(t))$) так, чтобы обеспечить одноосную стабилизацию твердого тела в заданном направлении вектора $\mathbf{s}$ [12]: система уравнений (1), (2) должна иметь асимптотически устойчивое положение равновесия $\boldsymbol{\omega} = 0$, $\mathbf{s} = \mathbf{r}$.

Известно [12, 13], что для решения поставленной задачи момент $\mathbf{M}_u$ можно определить по формуле $\mathbf{M}_u = -a\mathbf{s}(t) \times \mathbf{r}$, где $a = \mathrm{const} > 0$.

Предположим теперь, что задержки при измерении координат вектора $\mathbf{s}(t)$, передаче измеряемых значений в управляющее устройство, при формировании управляющего сигнала и его передаче на исполнительное устройство приводят к запаздыванию в канале обратной связи. Значение запаздывания может быть неизвестно, а также может меняться в процессе функционирования системы. Тогда в управлении вместо $\mathbf{s}(t)$ будет реально использоваться $\mathbf{s}(t - \tau(t))$. В настоящей работе предполагается, что функция $\tau(t)$ непрерывна, неотрицательна и ограничена на промежутке $[0, +\infty)$.

Таким образом, получим систему, состоящую из динамических уравнений

$$\begin{aligned}\mathbf{\Theta}\dot{\boldsymbol{\omega}}(t) + \boldsymbol{\omega}(t) \times \mathbf{\Theta}\boldsymbol{\omega}(t) = \\ = -h\mathbf{D}\boldsymbol{\omega}(t) - a\mathbf{s}(t - \tau(t)) \times \mathbf{r}\end{aligned} \tag{4}$$

и кинематических уравнений (2).

Цель данной статьи — определить условия, при выполнении которых запаздывание не нарушает асимптотическую устойчивость положения равновесия. Кроме того, исследуем случай, когда в системе (1) момент $\mathbf{M}_u$ является существенно нелинейным, и покажем, что при таком управлении положение равновесия будет асимптотически устойчивым для любого непрерывного неотрицательного и ограниченного запаздывания.

2. Линейный управляющий момент

Рассмотрим систему (2), (4). Пусть $\tau_0 = \sup\limits_{t \geqslant 0} \tau(t)$. Будем считать, что начальные функции $\boldsymbol{\varphi}(\xi)$ для решений изучаемой системы принадлежат пространству $C[-\tau_0, 0]$ непрерывных векторных функций с равномерной нормой $\|\boldsymbol{\varphi}\|_{\tau_0} = \max\limits_{\xi \in [-\tau_0, 0]} \|\boldsymbol{\varphi}(\xi)\|$, а под $\|\cdot\|$ будем понимать евклидову норму вектора.

Для получения условий, при выполнении которых выбранное управление обеспечивает одноосную стабилизацию тела, воспользуемся подходами, предложенными в работах [15—18].

Теорема 1. Для любого непрерывного неотрицательного и ограниченного при $t \in [0, +\infty)$ запаздывания $\tau(t)$ существует число $h_0 > 0$ такое, что при всех $h \geqslant h_0$ положение равновесия $\boldsymbol{\omega} = \mathbf{0}$, $\mathbf{s} = \mathbf{r}$ системы (2), (4) будет асимптотически устойчиво.

Доказательство. С помощью замены переменных

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{s}(t) - \mathbf{r} - \frac{1}{h}(\mathbf{D}^{-1}\mathbf{\Theta}\boldsymbol{\omega}(t)) \times \mathbf{r}$$

приводим систему (2), (4) к виду

$$\begin{aligned}
&\mathbf{\Theta}\dot{\boldsymbol{\omega}}(t) + \boldsymbol{\omega}(t) \times \mathbf{\Theta}\boldsymbol{\omega}(t) = \\
&= -h\mathbf{D}\boldsymbol{\omega}(t) - a\mathbf{y}(t - \tau(t)) \times \mathbf{r} - \\
&- \frac{a}{h}((\mathbf{D}^{-1}\mathbf{\Theta}\boldsymbol{\omega}(t - \tau(t))) \times \mathbf{r}) \times \mathbf{r}; \\
&\dot{\mathbf{y}}(t) = \frac{a}{h}(\mathbf{D}^{-1}(\mathbf{y}(t - \tau(t)) \times \mathbf{r})) \times \mathbf{r} + \\
&+ \frac{a}{h^2}(\mathbf{D}^{-1}(((\mathbf{D}^{-1}\mathbf{\Theta}\boldsymbol{\omega}(t - \tau(t))) \times \mathbf{r}) \times \mathbf{r})) \times \mathbf{r} - \\
&- \boldsymbol{\omega}(t)\left(\mathbf{y}(t) + \frac{1}{h}(\mathbf{D}^{-1}\mathbf{\Theta}\boldsymbol{\omega}(t)) \times \mathbf{r}\right) + \frac{1}{h}(\mathbf{D}^{-1}(\boldsymbol{\omega}(t) \times \mathbf{\Theta}\boldsymbol{\omega}(t)) \times \mathbf{r}.
\end{aligned} \tag{5}$$

Положению равновесия $\boldsymbol{\omega} = \mathbf{0}$, $\mathbf{s} = \mathbf{r}$ исходных уравнений соответствует нулевое решение новой системы.

Функцию Ляпунова выбираем в виде

$$V(\boldsymbol{\omega}, \mathbf{y}) = \frac{1}{2}\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{T}}\mathbf{\Theta}\boldsymbol{\omega} + \frac{\varepsilon h^2}{2}\mathbf{y}^{\mathrm{T}}\mathbf{y},$$

где ε — положительный параметр. Дифференцируя ее в силу системы (5), имеем

$$\dot V = -h\boldsymbol{\omega}^{\mathrm T}(t)\mathbf{D}\boldsymbol{\omega}(t) - a\boldsymbol{\omega}^{\mathrm T}(t)(\mathbf{y}(t-\tau(t)) \times \mathbf{r}) -$$
$$- \frac{a}{h}\boldsymbol{\omega}^{\mathrm T}(t)(((\mathbf{D}^{-1}\boldsymbol{\Theta}\boldsymbol{\omega}(t-\tau(t))) \times \mathbf{r}) \times \mathbf{r}) +$$
$$+ \varepsilon ah\mathbf{y}^{\mathrm T}(t)((\mathbf{D}^{-1}(\mathbf{y}(t) \times \mathbf{r})) \times \mathbf{r}) + \varepsilon ah\mathbf{y}^{\mathrm T}(t) \times$$
$$\times ((\mathbf{D}^{-1}((\mathbf{y}(t-\tau(t)) - \mathbf{y}(t)) \times \mathbf{r})) \times \mathbf{r}) -$$
$$- \varepsilon h^2\mathbf{y}^{\mathrm T}(t)(\boldsymbol{\omega}(t) \times \left(\mathbf{y}(t) + \frac{1}{h}(\mathbf{D}^{-1}\boldsymbol{\Theta}\boldsymbol{\omega}(t)\right) \times \mathbf{r})) +$$
$$+ \varepsilon h\mathbf{y}^{\mathrm T}(t)((\mathbf{D}^{-1}(\boldsymbol{\omega}(t) \times \boldsymbol{\Theta}\boldsymbol{\omega}(t))) \times \mathbf{r}) +$$
$$+ \varepsilon a\mathbf{y}^{\mathrm T}(t)((\mathbf{D}^{-1}(((\mathbf{D}^{-1}\boldsymbol{\Theta}\boldsymbol{\omega}(t-\tau(t))) \times \mathbf{r}) \times \mathbf{r})) \times \mathbf{r}).$$

Заметим, что

$$\mathbf{y}^{\mathrm T}(t)((\mathbf{D}^{-1}(\mathbf{y}(t) \times \mathbf{r})) \times \mathbf{r}) =$$
$$= -(\mathbf{y}(t) \times \mathbf{r})^{\mathrm T}\mathbf{D}^{-1}(\mathbf{y}(t) \times \mathbf{r}) \leqslant -\beta_1\|\mathbf{y}(t) \times \mathbf{r}\|^2 \leqslant$$
$$\leqslant -\beta_1\|\mathbf{s}(t) \times \mathbf{r}\|^2 + \frac{\beta_2}{h}\|\mathbf{s}(t) - \mathbf{r}\| \cdot \|\boldsymbol{\omega}(t)\|.$$

Здесь β_1 и β_2 — положительные постоянные. Кроме того, если $\|\mathbf{s}(t) - \mathbf{r}\|^2 \leqslant 2$, то $\|\mathbf{s}(t) - \mathbf{r}\|^2 \leqslant 2\|\mathbf{s}(t) \times \mathbf{r}\|^2$.

Значит, при $\|\mathbf{y}(t) + (\mathbf{D}^{-1}\boldsymbol{\Theta}\boldsymbol{\omega}(t)) \times \mathbf{r}/h\|^2 \leqslant 2$ справедлива оценка

$$\dot V \leqslant -hc_1\|\boldsymbol{\omega}(t)\|^2 - \varepsilon hc_2\|\mathbf{y}(t)\|^2 + c_3\Big(\frac{1}{h}\|\boldsymbol{\omega}(t)\| \cdot \|\boldsymbol{\omega}(t-\tau(t))\| +$$
$$+ \|\boldsymbol{\omega}(t)\| \cdot \|\mathbf{y}(t-\tau(t))\| + \varepsilon\|\boldsymbol{\omega}(t-\tau(t)\| \cdot \|\mathbf{y}(t)\| +$$
$$+ \varepsilon\|\boldsymbol{\omega}(t)\| \cdot \|\mathbf{y}(t)\| + \varepsilon h\|\mathbf{y}(t)\| \cdot \|\mathbf{y}(t-\tau(t)) - \mathbf{y}(t)\| +$$
$$+ \varepsilon h^2\|\boldsymbol{\omega}(t)\| \cdot \|\mathbf{y}(t)\|^2 + \varepsilon h\|\boldsymbol{\omega}(t)\|^2\|\mathbf{y}(t)\| + \frac{\varepsilon}{h}\|\boldsymbol{\omega}(t)\|^2\Big),$$

где $c_i = \mathrm{const} > 0$, $i = 1, 2, 3$.

Покажем, что если ε достаточно мало, а h достаточно велико, то функция $V(\boldsymbol{\omega}, \mathbf{y})$ удовлетворяет требованиям теоремы 31.4 об асимптотической устойчивости решений систем с запаздыванием из работы [9].

Выберем число $\delta > 0$. Предположим, что для решения $(\boldsymbol{\omega}^{\mathrm T}(t), \mathbf{y}^{\mathrm T}(t))^{\mathrm T}$ системы (5) при $\xi \in [t - 2\tau_0, t]$ выполнены неравенство $\|\boldsymbol{\omega}(t)\|^2 + \|\mathbf{y}(t)\|^2 < \delta$ и условие Разумихина $V(\boldsymbol{\omega}(\xi), \mathbf{y}(\xi)) < 2V(\boldsymbol{\omega}(t), \mathbf{y}(t))$. Тогда при $\xi \in [t - 2\tau_0, t]$ имеем

$$\|\boldsymbol{\omega}(\xi)\| \leqslant d_1(\|\boldsymbol{\omega}(t)\| + h\sqrt{\varepsilon}\,\|\mathbf{y}(t)\|),$$
$$\|\mathbf{y}(\xi)\| \leqslant d_2\left(\frac{1}{h\sqrt{\varepsilon}}\|\boldsymbol{\omega}(t)\| + \|\mathbf{y}(t)\|\right). \qquad (6)$$

Здесь $d_1 > 0$, $d_2 > 0$.

Используя оценки (6) и формулу конечных приращений Лагранжа, получаем

$$\|\mathbf{y}(t-\tau(t)) - \mathbf{y}(t)\| \leqslant$$
$$\leqslant \tilde b\,\tau_0\left(\left(1 + \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}\right)\frac{\|\boldsymbol{\omega}(t)\|}{h^2} + (1+\sqrt{\varepsilon})\frac{\|\mathbf{y}(t)\|}{h} + \|\boldsymbol{\omega}(t)\| \cdot \|\mathbf{y}(t)\| +\right.$$
$$\left. + \left(1 + \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}\right)\frac{\|\boldsymbol{\omega}(t)\|^2}{h} + (1 + \sqrt{\varepsilon})h\sqrt{\varepsilon}\,\|\mathbf{y}(t)\|^2\right),$$

где $\tilde b = \mathrm{const} > 0$.

Зафиксируем некоторое значение параметра ε, удовлетворяющее условию $c_2 > 2c_3\sqrt{\varepsilon}$. Тогда найдутся числа $h_0 > 0$ и $\delta_0 > 0$ такие, что при всех $h \geqslant h_0$ и $\delta \in (0, \delta_0)$ справедливо соотношение

$$\dot V(\boldsymbol{\omega}(t), \mathbf{y}(t)) \leqslant -\frac{1}{2}(hc_1\|\boldsymbol{\omega}(t)\|^2 + \varepsilon hc_2\|\mathbf{y}(t)\|^2).$$

Значит (см. [9, с. 184—186]), при $h \geqslant h_0$ нулевое решение системы (5) асимптотически устойчиво. Но тогда асимптотически устойчивым будет и положение равновесия $\boldsymbol{\omega} = \mathbf{0}$, $\mathbf{s} = \mathbf{r}$ системы (2), (4). Теорема доказана.

Замечание 1. Таким образом, в случае линейного управляющего момента дестабилизирующий эффект запаздывания может быть компенсирован за счет выбора достаточно большого значения коэффициента при моменте диссипативных сил.

Замечание 2. Доказательство теоремы 1 содержит конструктивную процедуру нахождения нижней оценки h_0 допустимых значений параметра h.

Замечание 3. Нетрудно проверить, что утверждение теоремы 1 справедливо и в случае, когда величина τ_0 зависит от h, причем функция $\tau_0(h)$ может быть неограниченной при $h \in (0, +\infty)$. Требуется только, чтобы выполнялось условие $\tau_0(h)/h \to 0$ при $h \to +\infty$.

3. Нелинейный управляющий момент

Выберем теперь нелинейный закон управления

$$\mathbf{M}_u = -a\|\mathbf{s}(t-\tau(t)) \times \mathbf{r}\|^{\mu-1}\mathbf{s}(t-\tau(t)) \times \mathbf{r},$$

где $a > 0$, $\mu > 1$. При этом по-прежнему считаем, что момент сил сопротивления определяется по формуле (3). Получим систему, состоящую из динамических уравнений

$$\boldsymbol{\Theta}\dot{\boldsymbol{\omega}}(t) + \boldsymbol{\omega}(t) \times \boldsymbol{\Theta}\boldsymbol{\omega}(t) =$$
$$= -h\mathbf{D}\boldsymbol{\omega}(t) - a\|\mathbf{s}(t-\tau(t)) \times \mathbf{r}\|^{\mu-1}\mathbf{s}(t-\tau(t)) \times \mathbf{r} \quad (7)$$

и кинематических уравнений (2).

Теорема 2. Положение равновесия $\boldsymbol{\omega} = \mathbf{0}$, $\mathbf{s} = \mathbf{r}$ системы (2), (7) асимптотически устойчиво при любом непрерывном неотрицательном и ограниченном при $t \in [0, +\infty)$ запаздывании $\tau(t)$.

Доказательство. Функцию Ляпунова строим в виде

$$V(\boldsymbol{\omega}, \mathbf{s}) = \frac{\beta}{2}\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Theta}\boldsymbol{\omega} + \frac{1}{2}\|\mathbf{s} - \mathbf{r}\|^2 + \frac{1}{h}(\mathbf{s} \times \mathbf{r})^{\mathrm{T}}\mathbf{D}^{-1}\boldsymbol{\Theta}\boldsymbol{\omega},$$
$$\beta = \mathrm{const} > 0.$$

Дифференцируя ее в силу системы (2), (7), имеем

$$\dot{V} = -\beta h\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{T}}(t)\mathbf{D}\boldsymbol{\omega}(t) -$$
$$- \frac{a}{h}\|\mathbf{s}(t - \tau(t)) \times \mathbf{r}\|^{\mu - 1}(\mathbf{s}(t) \times \mathbf{r})^{\mathrm{T}}\mathbf{D}^{-1}(\mathbf{s}(t - \tau(t)) \times \mathbf{r}) -$$
$$- \beta a\|\mathbf{s}(t - \tau(t)) \times \mathbf{r}\|^{\mu - 1}\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{T}}(t)(\mathbf{s}(t - \tau(t)) \times \mathbf{r}) -$$
$$- \frac{1}{h}((\boldsymbol{\omega}(t) \times \mathbf{s}(t)) \times \mathbf{r})^{\mathrm{T}}\mathbf{D}^{-1}\boldsymbol{\Theta}\boldsymbol{\omega}(t) -$$
$$- \frac{1}{h}(\mathbf{s}(t) \times \mathbf{r})^{\mathrm{T}}\mathbf{D}^{-1}(\boldsymbol{\omega}(t) \times \boldsymbol{\Theta}\boldsymbol{\omega}(t)).$$

Таким образом, справедливы оценки

$$c_1(\beta\|\boldsymbol{\omega}\|^2 + \|\mathbf{s} - \mathbf{r}\|^2) - c_3\|\boldsymbol{\omega}\| \cdot \|\mathbf{s} - \mathbf{r}\| \leqslant V(\boldsymbol{\omega}, \mathbf{s}) \leqslant$$
$$\leqslant c_2(\beta\|\boldsymbol{\omega}\|^2 + \|\mathbf{s} - \mathbf{r}\|^2) + c_3\|\boldsymbol{\omega}\| \cdot \|\mathbf{s} - \mathbf{r}\|;$$

$$\dot{V} \leqslant -c_4(\beta\|\boldsymbol{\omega}(t)\|^2 + \|\mathbf{s}(t) \times \mathbf{r}\|^{\mu + 1}) + c_5(\|\boldsymbol{\omega}(t)\|^2 +$$
$$+ \|\boldsymbol{\omega}(t)\|^2\|\mathbf{s}(t) - \mathbf{r}\| + \beta\|\boldsymbol{\omega}(t)\| \cdot \|\mathbf{s}(t - \tau(t)) - \mathbf{r}\|^{\mu}) +$$
$$+ c_6\|\mathbf{s}(t) - \mathbf{r}\| \cdot \Big\|\|\mathbf{s}(t - \tau(t)) \times \mathbf{r}\|^{\mu - 1}\mathbf{s}(t - \tau(t)) \times \mathbf{r} -$$
$$- \|\mathbf{s}(t) \times \mathbf{r}\|^{\mu - 1}\mathbf{s}(t) \times \mathbf{r}\Big\|.$$

Здесь c_i, $i = 1, ..., 6$, — положительные постоянные, не зависящие от выбранного значения параметра β.

Зададим число δ, $0 < \delta < 2$. Предположим, что для решения $(\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{T}}(t), \mathbf{s}^{\mathrm{T}}(t))^{\mathrm{T}}$ системы (2), (7) при $\xi \in [t - 2\tau_0, t]$ выполнены неравенство $\|\boldsymbol{\omega}(t)\|^2 + + \|\mathbf{s}(t) - \mathbf{r}\|^2 < \delta$ и условие Разумихина $V(\boldsymbol{\omega}(\xi), \mathbf{s}(\xi)) < 2V(\boldsymbol{\omega}(t), \mathbf{s}(t))$. Если β достаточно велико, то

$$\frac{1}{2}c_1(\beta\|\boldsymbol{\omega}\|^2 + \|\mathbf{s} - \mathbf{r}\|^2) \leqslant V(\boldsymbol{\omega}, \mathbf{s}) \leqslant 2c_2(\beta\|\boldsymbol{\omega}\|^2 + \|\mathbf{s} - \mathbf{r}\|^2),$$

откуда следует существование чисел $d_1 > 0$ и $d_2 > 0$ таких, что

$$\|\boldsymbol{\omega}(\xi)\| \leqslant d_1\Big(\|\boldsymbol{\omega}(t)\| + \frac{1}{\sqrt{\beta}}\|\mathbf{s}(t) - \mathbf{r}\|\Big),$$
$$\|\mathbf{s}(\xi) - \mathbf{r}\| \leqslant d_2(\sqrt{\beta}\,\|\boldsymbol{\omega}(t)\| + \|\mathbf{s}(t) - \mathbf{r}\|) \qquad (8)$$

при $\xi \in [t - 2\tau_0, t]$.

С помощью оценок (8) и формулы конечных приращений Лагранжа получаем

$$\|\mathbf{s}(t - \tau(t)) - \mathbf{r}\|^{\mu} \leqslant \rho_1(\|\mathbf{s}(t) - \mathbf{r}\|^{\mu} + \beta^{\mu/2}\|\boldsymbol{\omega}(t)\|^{\mu}),$$

$$\Big\|\|\mathbf{s}(t - \tau(t)) \times \mathbf{r}\|^{\mu - 1}\mathbf{s}(t - \tau(t)) \times \mathbf{r} -$$
$$- \|\mathbf{s}(t) \times \mathbf{r}\|^{\mu - 1}\mathbf{s}(t) \times \mathbf{r}\Big\| \leqslant \rho_2\Big(\frac{1}{\sqrt{\beta}}\|\mathbf{s}(t) - \mathbf{r}\|^{\mu} +$$
$$+ \|\boldsymbol{\omega}(t)\| \cdot \|\mathbf{s}(t) - \mathbf{r}\|^{\mu - 1} + \beta^{(\mu - 2)/2}\|\boldsymbol{\omega}(t)\|^{\mu - 1}\|\mathbf{s}(t) - \mathbf{r}\| +$$
$$+ \beta^{(\mu - 1)/2}\|\boldsymbol{\omega}(t)\|^{\mu}\Big),$$

где ρ_1 и ρ_2 — положительные постоянные.

Используя эти соотношения, а также неравенство $\|\mathbf{s}(t) - \mathbf{r}\|^2 \leqslant 2\|\mathbf{s}(t) \times \mathbf{r}\|^2$, имеем

$$\dot{V} \leqslant -c_4\Big(\beta\|\boldsymbol{\omega}(t)\|^2 + \frac{1}{2}\|\mathbf{s}(t) - \mathbf{r}\|^{\mu + 1}\Big) + c_5(\|\boldsymbol{\omega}(t)\|^2 +$$
$$+ \|\boldsymbol{\omega}(t)\|^2\|\mathbf{s}(t) - \mathbf{r}\|) + c_5\rho_1\beta\|\boldsymbol{\omega}(t)\|(\|\mathbf{s}(t) - \mathbf{r}\|^{\mu} +$$
$$+ \beta^{\mu/2}\|\boldsymbol{\omega}(t)\|^{\mu}) + c_6\rho_2\|\mathbf{s}(t) - \mathbf{r}\|\Big(\frac{1}{\sqrt{\beta}}\|\mathbf{s}(t) - \mathbf{r}\|^{\mu} +$$
$$+ \|\boldsymbol{\omega}(t)\| \cdot \|\mathbf{s}(t) - \mathbf{r}\|^{\mu - 1} + \beta^{(\mu - 2)/2}\|\boldsymbol{\omega}(t)\|^{\mu - 1}\|\mathbf{s}(t) - \mathbf{r}\| +$$
$$+ \beta^{(\mu - 1)/2}\|\boldsymbol{\omega}(t)\|^{\mu}\Big).$$

Следовательно (см. [19, с. 187—190]), найдутся числа $\beta_0 > 0$ и $\delta_0 > 0$ такие, что при $\beta \geqslant \beta_0$ и $\delta \in (0, \delta_0)$ справедлива оценка

$$\dot{V}(\boldsymbol{\omega}(t), \mathbf{s}(t)) \leqslant -\frac{1}{4}c_4\Big(\beta\|\boldsymbol{\omega}(t)\|^2 + \frac{1}{2}\|\mathbf{s}(t) - \mathbf{r}\|^{\mu + 1}\Big).$$

Значит, функция $V(\boldsymbol{\omega}, \mathbf{s})$ удовлетворяет требованиям теоремы 31.4 об асимптотической устойчивости решений систем с запаздыванием из работы [9], и положение равновесия $\boldsymbol{\omega} = \mathbf{0}$, $\mathbf{s} = \mathbf{r}$ системы (2), (7) асимптотически устойчиво.

Теорема доказана.

Замечание 4. В отличие от теоремы 1, в теореме 2 на значение параметра h никаких дополнительных ограничений не накладывается.

Заключение

В данной работе предложены два способа построения управлений, обеспечивающих одноосную стабилизацию твердого тела при наличии запаздывания в канале обратной связи. Заметим, что в случае линейного управляющего момента диапазон допустимых значений запаздывания зависит от коэффициента h, характеризующего значение момента диссипативных сил, в то время как в случае существенно нелинейного управления асимптотическая устойчивость положения равновесия гарантируется при любом непрерывном ограниченном и неотрицательном запаздывании.

В качестве направления дальнейших исследований отметим возможность применения предложенных подходов для решения задачи трехосной стабилизации твердого тела.

Список литературы

1. **Воротников В. И., Румянцев В. В**. Устойчивость и управление по части координат фазового вектора динамических систем: теория, методы и приложения. М.: Научный мир, 2001.

2. **Gu K., Kharitonov V. L., Chen J.** Stability of Time-delay Systems. Boston: Birkhauser, 2003.
3. **Hale J. K., Verduyn Lunel S. M.** Introduction to Functional Differential Equations. New York: Springer-Verlag, 1993.
4. **Haddad W. M., Chellaboina V.** Stability Theory for Nonnegative and Compartmental Dynamical Systems with Time Delay // Systems and Control Letters. 2004. V. 51. P. 355—361.
5. **Kuang Y.** Delay Differential Equations with Applications in Population Dynamics. Boston: Academic Press, 1993.
6. **Балашевич Н. В., Габасов Р., Кириллова Ф. М.** Стабилизация динамических систем при наличии запаздываний в канале обратной связи // Автоматика и телемеханика. 1996. № 6. С. 31—39.
7. **Павликов С. В.** О стабилизации движений управляемых механических систем с запаздывающим регулятором // Доклады Академии наук. 2007. Т. 412. № 2. С. 176—178.
8. **Niculescu S.** Delay Effects on Stability: A Robust Control Approach. Lecture Notes in Control and Information Science. New York, Berlin, Heidelberg: Springer, 2001.
9. **Красовский Н. Н.** Некоторые задачи теории устойчивости движения. М.: Физматгиз, 1959.
10. **Разумихин Б. С.** Об устойчивости систем с запаздыванием // Прикладная математика и механика. 1956. Т. 20. Вып. 4. С. 500—512.
11. **Александров А. Ю., Жабко А. П.** Об асимптотической устойчивости решений нелинейных систем с запаздыванием // Сибирский математический журнал. 2012. Т. 53. № 3. С. 495—508.
12. **Зубов В. И.** Лекции по теории управления. М.: Наука, 1976.
13. **Смирнов Е. Я.** Некоторые задачи математической теории управления. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981.
14. **Лурье А. И.** Аналитическая механика. М.: Физматгиз, 1961.
15. **Косов А. А.** Исследование устойчивости сингулярных систем методом вектор-функций Ляпунова // Вестник С.-Петерб. ун-та. Серия 10. Вып. 4. С. 123—129.
16. **Aleksandrov A. Yu., Chen Y., Kosov A. A., Zhang L.** Stability of Hybrid Mechanical Systems with Switching Linear Force Fields // Nonlinear Dynamics and Systems Theory. 2011. V. 11. N. 1. P. 53—64.
17. **Александров А. Ю., Александрова Е. Б., Жабко А. П.** Анализ устойчивости гироскопических систем с запаздыванием на основе прямого метода Ляпунова // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 5. С. 3—7.
18. **Aleksandrov A. Yu., Aleksandrova E. B., Zhabko A. P.** Asymptotic Stability Conditions for Certain Classes of Mechanical Systems with Time Delay // WSEAS Transactions on Systems and Control. 2014. V. 9. P. 398—407.
19. **Зубов В. И.** Математические методы исследования систем автоматического регулирования. Л.: Судпромгиз, 1959.

A. Yu. Aleksandrov, Professor, Head of Department of Medical and Biological Systems Control, alex43102006@yandex.ru,
E. B. Aleksandrova, Associate professor, star1460@yandex.ru, Saint Petersburg State University

Monoaxial Stabilization of a Rigid Body under a Delay in Feedback Law

A rigid body rotating around a fixed point coinciding with its center of inertia under the action of a torque of dissipative forces and a control torque is considered. It is assumed that the dissipative forces are linear ones, and there is a positive parameter at the torque of these forces. Moreover, we consider the case when feedback law contains a delay which is continuous bounded and nonnegative function of time. The delay might be unknown, and only an upper bound for its values is given. Two approaches for the synthesis of control laws providing monoaxial stabilization of the body are proposed. The first one is based on the constructing of a linear control torque, while in the second one essentially nonlinear control torque is constructed. By the usage of the Lyapunov functions method and the Razumikhin approach, conditions are determined under which delay does not disturb the asymptotic stability of the given equilibrium position of the body. It is shown that in the case of linear control torque the destabilizing effect of delay can be compensated via the choosing of sufficiently large value of parameter at the dissipative torque, whereas in the case of essentially nonlinear control torque one can guarantee delay-independent asymptotic stability of the equilibrium position for any positive value of this parameter.

Keywords: *rigid body, monoaxial stabilization, asymptotic stability, delay, Lyapunov functions*

References

1. **Vorotnikov V. I., Rumjancev V. V.** Ustojchivost' i upravlenie po chasti koordinat fazovogo vektora dinamicheskih sistem: teorija, metody i prilozhenija. M.: Nauchnyj mir, 2001.
2. **Gu K., Kharitonov V. L., Chen J.** Stability of Time-delay Systems. Boston: Birkhauser, 2003.
3. **Hale J. K., Verduyn Lunel S. M.** Introduction to Functional Differential Equations. New York: Springer-Verlag, 1993.
4. **Haddad W. M., Chellaboina V.** Stability Theory for Nonnegative and Compartmental Dynamical Systems with Time Delay. *Systems and Control Letters. 2004.* V. 51. P. 355—361.
5. **Kuang Y.** Delay Differential Equations with Applications in Population Dynamics. Boston: Academic Press, 1993.
6. **Balashevich N. V., Gabasov R., Kirillova F. M.** Stabilizacija dinamicheskih sistem pri nalichii zapazdyvanij v kanale obratnoj svjazi. *Avtomatika i telemehanika.* 1996. N. 6. P. 31—39.
7. **Pavlikov S. V.** O stabilizacii dvizhenij upravljaemyh mehanicheskih sistem s zapazdyvajushhim reguljatorom. *Doklady Akademii nauk.* 2007. V. 412, N. 2. P. 176—178.
8. **Niculescu S.** Delay Effects on Stability: A Robust Control Approach. Lecture Notes in Control and Information Science. New York, Berlin, Heidelberg: Springer, 2001.
9. **Krasovskij N. N.** Nekotorye zadachi teorii ustojchivosti dvizhenija. M.: Fizmatgiz, 1959.
10. **Razumihin B. S.** Ob ustojchivosti sistem s zapazdyvaniem. *Prikladnaja matematika i mehanika.* 1956. V. 20, Iss. 4. P. 500—512.
11. **Aleksandrov A. Yu., Zhabko A. P.** Ob asimptoticheskoj ustojchivosti reshenij nelinejnyh sistem s zapazdyvaniem. *Sibirskij matematicheskij zhurnal.* 2012. V. 53, N. 3. P. 495—508.
12. **Zubov V. I.** Lekcii po teorii upravlenija. M.: Nauka, 1976.
13. **Smirnov E. Ya.** Nekotorye zadachi matematicheskoj teorii upravlenija. L.: Izd-vo Leningr. un-ta, 1981.
14. **Lur'e A. I.** Analiticheskaja mehanika. M.: Fizmatgiz, 1961.
15. **Kosov A. A.** Issledovanie ustojchivosti singuljarnyh sistem metodom vektor-funkcij Ljapunova. *Vestnik S.-Peterb. un-ta.* Ser. 10. Iss. 4. P. 123—129.
16. **Aleksandrov A. Yu., Chen Y., Kosov A. A., Zhang L.** Stability of Hybrid Mechanical Systems with Switching Linear Force Fields. *Nonlinear Dynamics and Systems Theory.* 2011. V. 11, N. 1. P. 53—64.
17. **Aleksandrov A. Yu., Aleksandrova E. B., Zhabko A. P.** Analiz ustojchivosti giroskopicheskih sistem s zapazdyvaniem na osnove prjamogo metoda Ljapunova. Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie. 2014. N. 5. P. 3—7.
18. **Aleksandrov A. Yu., Aleksandrova E. B., Zhabko A. P.** Asymptotic Stability Conditions for Certain Classes of Mechanical Systems with Time Delay. *WSEAS Transactions on Systems and Control.* 2014. V. 9. P. 398—407.
19. **Zubov V. I.** Matematicheskie metody issledovanija sistem avtomaticheskogo regulirovanija. L.: Sudpromgiz, 1959.

УДК 531.36

А. А. Косов, канд. физ.-мат. наук, ведущий науч. сотр.
Институт динамики систем и теории управления СО РАН, г. Иркутск

О построении стабилизирующего управления для одной механической системы с переключениями[1]

Изучается управляемая механическая система, состоящая из движущихся вдоль одной прямой масс, взаимодействующих между собой посредством переключаемых упругих сил и находящихся под действием переключаемых диссипативных сил. Рассматривается задача стабилизации положения равновесия системы за конечное время при произвольном режиме переключений. Предложен простой закон обратной связи, гарантирующий перевод в состояние равновесия за конечное время из малой окрестности с последующим удержанием при произвольном режиме переключений для упругих и диссипативных сил.

Ключевые слова: *гибридные механические системы, управление, стабилизация, функции Ляпунова*

Введение

В современной теории управления активно изучаются гибридные системы, описываемые дифференциальными уравнениями с переключениями правых частей в ходе процесса управления [1, 2]. Такие системы с переключениями встречаются в задачах управления механическими объектами со структурной реконфигурацией, отказами и восстановлениями датчиков или исполнительных органов [3]. Наличие переключений существенно затрудняет решение задач синтеза стабилизирующих управлений, поэтому актуальной задачей является развитие теории управления для такого рода гибридных механических систем [4]. Основным, а часто и единственным, строгим методом исследования динамики гибридных систем обычно выступает метод функций Ляпунова (см., например, работы [5—9]).

Основная цель данной работы — построение стабилизирующего закона обратной связи для управляемой механической системы, состоящей из движущихся вдоль одной прямой масс, взаимодействующих между собой посредством переключаемых упругих сил и находящихся под действием переключаемых диссипативных сил. Предложен простой закон обратной связи, гарантирующий при произвольном режиме переключений для упругих и диссипативных сил перевод в состояние равновесия за конечное время из малой окрестности этого равновесия с последующим удержанием.

Рассмотрим механическую систему, состоящую из n тележек, двигающихся вдоль одной горизонтальной прямой. Масса i-й тележки m_i, все тележки соединены со стенами и между собой пружинами и демпферами, так что число пружин (и демпферов) на единицу больше числа тележек. Для примера на рис. 1 показана система из двух однотипных тележек. Состоянию равновесия механической системы соответствует такое положение тележек, при котором все пружины не деформированы.

Коэффициенты жесткости пружин c_i и коэффициенты демпфирования b_i будем считать переключаемыми на два возможных значения в процессе функционирования. Переключения могут происходить в произвольные моменты времени и не контролируются, поэтому при конструировании обратной связи невозможно использовать информацию о законе переключения и о том, каковы именно значения коэффициентов жесткости и демпфирования в каждый текущий момент времени. Физические причины возникновения переключений могут быть самыми разными, например, вызванными отсоединением пружин от креплений или "пробоем" демпферов. Значения же координат и скоростей в каждый момент времени считаются доступными для измерения, и их можно использовать в канале обратной связи. Предполагается, что на каждую i-ю тележку действует управляющая сила u_i, формируемая по принципу обратной связи: $u_i = u_i(x, \dot{x})$. Заметим, что если никаких переключений нет, то ввиду действия только возвращающих сил упругости и сил сопротивления с полной диссипацией положение равновесия будет асимптотически устойчивым. Но даже в этом случае переход в положение равновесия будет только асимптотическим, происходящим за бесконечный промежуток времени.

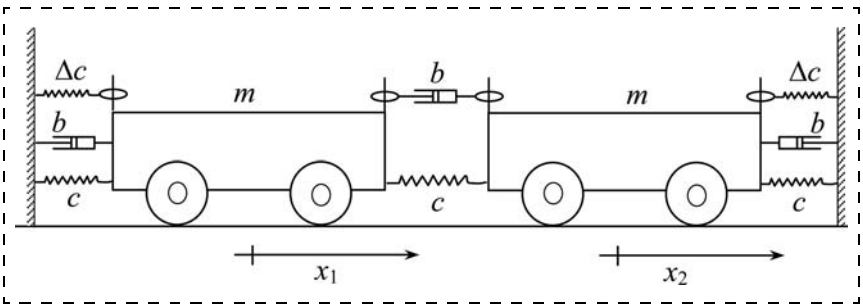

Рис. 1. Переключаемая пружинно-массовая система

[1] Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 13-08-00948).

При наличии переключений равновесие может потерять устойчивость [8, 9], и система не будет приходить к равновесию даже и после бесконечно длительного промежутка времени.

Требуется выбрать закон обратной связи $u_i = u_i(x, \dot{x})$ так, чтобы положение равновесия в замкнутой системе стало асимптотически устойчивым, и переход в него из любого начального состояния, лежащего в малой окрестности равновесия, происходил за конечное время при любом режиме переключений.

Уравнения движения рассматриваемой системы с переключениями и управлением имеют вид

$$\begin{aligned}
&m_1\ddot{x}_1 + b_1\dot{x}_1 - b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + c_1x_1 - \\
&- c_2(x_2 - x_1) = u_1(x, \dot{x}); \\
&m_2\ddot{x}_2 + b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - b_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + \\
&+ c_2(x_2 - x_1) - c_3(x_3 - x_2) = u_2(x, \dot{x}); \\
&\dots\dots\dots \\
&m_{n-1}\ddot{x}_{n-1} + b_{n-1}(\dot{x}_{n-1} - \dot{x}_{n-2}) - \\
&- b_n(\dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}) + c_{n-1}(x_{n-1} - x_{n-2}) - \\
&- c_n(x_n - x_{n-1}) = u_{n-1}(x, \dot{x}); \\
&m_n\ddot{x}_n + b_n(\dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}) + b_{n+1}\dot{x}_{n+1} + \\
&+ c_n(x_n - x_{n-1}) + c_{n+1}x_{n+1} = u_n(x, \dot{x}).
\end{aligned} \tag{1}$$

Здесь $b_k = \overline{b}_k + \delta_k(t)\Delta b_k$, функция $\delta_k(t)$ может принимать только значения 0 или 1 и задает закон переключения коэффициента демпфирования b_k между двумя постоянными значениями $\overline{b}_k$ и $\overline{b}_k + \Delta b_k$; $c_k = \overline{c}_k + \sigma_k(t)\Delta c_k$, функция $\sigma_k(t)$ может принимать только значения 0 или 1 и задает закон переключения коэффициента жесткости c_k между двумя постоянными значениями $\overline{c}_k$ и $\overline{c}_k + \Delta c_k$, $k = 1, 2, \dots, n + 1$.

Заметим, что в работе [9] были получены условия на коэффициенты, гарантирующие асимптотическую устойчивость положения равновесия этой системы при произвольных переключениях для частного случая двух подвижных масс, т. е. при $n = 2$. Однако без управления даже при выполнении упомянутых условий достижение положения равновесия за конечное время невозможно.

Задача синтеза управления, переводящего фазовый вектор в положение равновесия из малой окрестности, рассматривалась и успешно решалась для систем без переключений в работе [10]. При наличии переключений динамика системы существенно усложняется, поэтому могут возникать новые особенности и условия применимости известных подходов и требуется разработка подхода, применимого при произвольном и неизвестном режиме переключений.

2. Построение стабилизирующей обратной связи

Рассмотрим систему (1), пренебрегая всеми переключаемыми силами в уравнениях движения, тогда система декомпозируется и принимает вид

$$m_k\ddot{x}_k = u_k(x, \dot{x}),\ k = 1, 2, \dots, n. \tag{2}$$

Выберем закон управления в виде

$$\begin{gathered}
u_k(x, \dot{x}) = -\alpha_k x_k^{1/5} - \beta_k \dot{x}_k^{1/3}, \\
\alpha_k > 0,\ \beta_k > 0,\ k = 1, 2, \dots, n.
\end{gathered} \tag{3}$$

Тогда для замкнутой системы (2), (3) и функции Ляпунова

$$\begin{gathered}
V(x, \dot{x}) = \sum_{k=1}^{n}\left(\frac{1}{2}\dot{x}_k^2 + \frac{5\alpha_k}{6m_k}x_k^{6/5}\right), \\
\alpha_k > 0,\ \beta_k > 0,\ k = 1, 2, \dots, n,
\end{gathered} \tag{4}$$

получаем $\left.\dfrac{dV}{dt}\right|_{(2),(3)} = -\sum\limits_{k=1}^{n}\dfrac{\beta_k}{m_k}\dot{x}_k^{4/3} \leqslant 0$. Таким образом, как нетрудно видеть, для замкнутой системы (2), (3) выполнены все условия теоремы Барбашина—Красовского, поэтому положение равновесия $x = \dot{x} = 0$ этой системы асимптотически устойчиво. Замкнутая система (2), (3) является в соответствии с определением [11] обобщенно однородной класса $\left(\frac{1}{3}, \frac{1}{5}\right)$ порядка $\mu = -\frac{2}{15} < 0$ относительно переменных $(x, \dot{x})$. Поэтому в соответствии с теоремой обращения [11] существует такая обобщенно однородная положительно определенная функция Ляпунова $v(x, \dot{x})$, производная которой в силу замкнутой системы (2), (3) является отрицательно определенной обобщенно однородной функцией. Так как эта функция никак не зависит от переключений, то мы можем рассматривать ее как общую функцию Ляпунова для замкнутой системы (1), (3).

Обозначим входящие в левые части k-го уравнения системы (1) переключаемые диссипативные и потенциальные силы $F_k(\delta(t), \sigma(t), x, \dot{x})$. Тогда из линейной зависимости этих сил от координат и скоростей следует справедливость оценок $|F_k(\delta(t), \sigma(t), x, \dot{x})| \leqslant C(\|x\| + \|\dot{x}\|)$, где $C > 0$ — некоторая постоянная. Применяя теперь теоремы 2 и 3 из работы [6], получаем, что справедливо следующее утверждение.

Теорема 1. *Если в системе (1) управляющие силы в правых частях выбраны в виде (3), то положение равновесия замкнутой системы асимптотически устойчиво, и все решения, начинающиеся в малой окрестности равновесия, за конечное время достигают положения равновесия и в дальнейшем в нем остаются.*

Заметим, что закон управления (3) задается простыми степенными функциями и не требует проведения расчетов по сложным алгоритмам для вычисления текущих значений управляющего сигнала. Это свойство может быть очень полезным при практи-

ческой реализации предлагаемого закона управления. Кроме этого, если предполагать, что затраты на реализацию управления пропорциональны управляющему сигналу, то из степенного характера (3) следует, что при приближении к положению равновесия значение управления уменьшается и за конечное время обращается в ноль, соответственно обнуляются и текущие затраты на управление.

3. Моделирование динамики замкнутой системы

В качестве примера рассмотрим динамику двухмассовой системы, показанной на рис. 1, при следующих значениях параметров: $m_1 = 1$, $m_2 = 2$, $c_k = 1$, $b_k = 1$, $\Delta c_k = 0{,}5$, $\Delta b_k = 0{,}5$, $k = 1, 2, 3$, и коэффициентов обратной связи: $\alpha_1 = \alpha_2 = \beta_1 = \beta_2 = 1$.

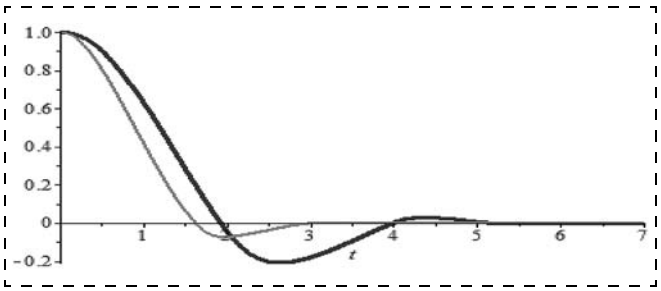

Рис. 2. Приведение координат тележек к равновесию за конечное время. Тонкая линия — координата первой тележки, толстая линия — координата второй, более массивной тележки

На рис. 2 показана динамика изменения координат тележек. Положение равновесия в начале координат достигается за конечное время и в дальнейшем система остается в равновесии.

На рис. 3 показана динамика изменения скоростей тележек. Скорости приводятся к нулю за конечное время. Моментам переключения упругих сил и сил сопротивления соответствуют изломы кривых.

На рис. 4 показаны изменения управляющих сигналов обратной связи для обеих тележек. Оба управляющих сигнала сходятся к нулю за конечное время.

Заключение

В статье предложен простой степенной закон стабилизирующей обратной связи, гарантирующий приведение в положение равновесия за конечное время из малой окрестности для механической системы с переключениями. Рассматривается механическая система, состоящая из конечного числа движущихся вдоль одной прямой тележек, подверженных действию переключаемых упругих и диссипативных сил. Заметим, что предложенный подход для решения задачи стабилизации за конечное время может успешно применяться не только к данной системе, но и к существенно более общему классу механических систем с переключениями, описываемых уравнениями Лагранжа. При этом для приведения состояния в малую окрестность равновесия за конечное время можно использовать и линейную обратную связь.

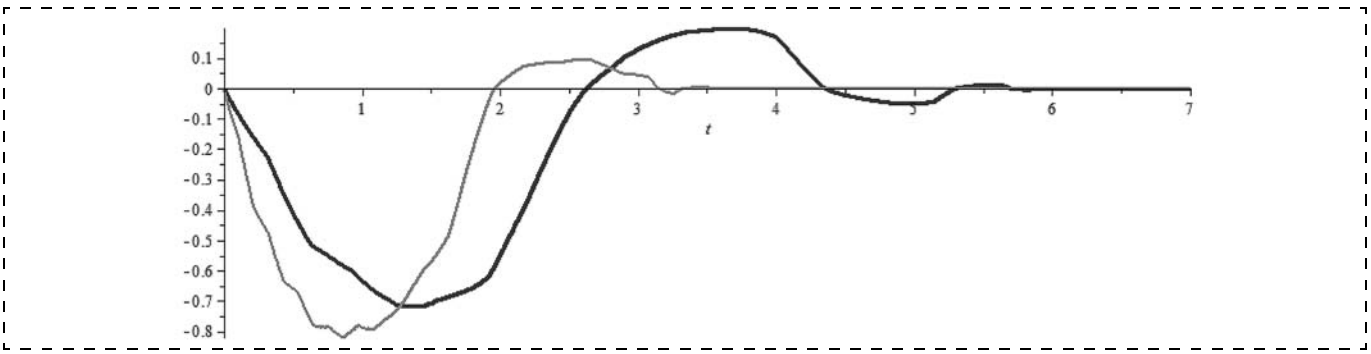

Рис. 3. Приведение скоростей тележек к нулю за конечное время. Тонкая линия — скорость движения первой тележки, толстая линия — скорость второй, более массивной тележки

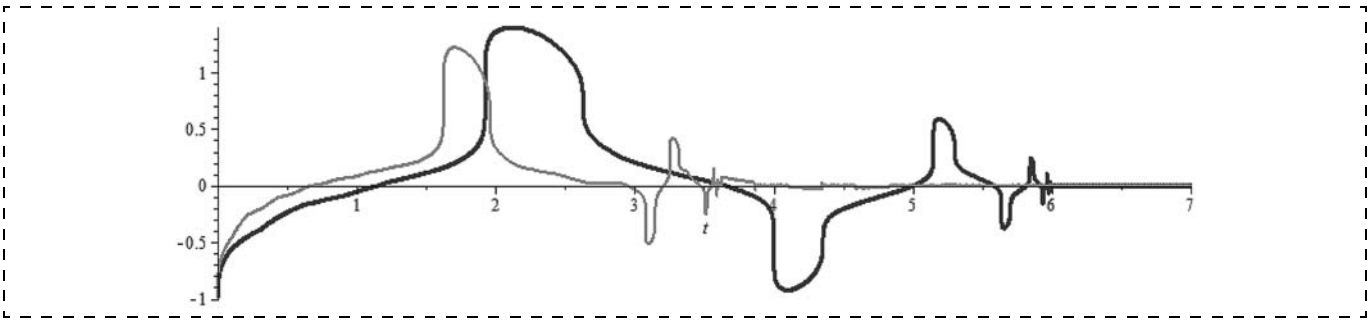

Рис. 4. Управляющие силы, действующие на тележки. Тонкая линия — управление для первой тележки, толстая линия — управление для второй, более массивной тележки

Список литературы

1. **Shorten R., Wirth F., Mason O., Wulf K., King C.** Stability Criteria for Switched and Hybrid Systems // SIAM Rev. 2007. V. 49, N. 4. P. 545—592.
2. **Hai Lin, Antsaklis P. J.** Stability and Stabilizability of Switched Linear Systems: a Survey of Recent Results // IEEE Trans. Automat. Contr. 2009. V. 54, N. 2. P. 308—322.
3. **Александров А. Ю., Косов А. А., Чэнь Я.** Об устойчивости и стабилизации механических систем с переключениями // Автоматика и телемеханика. 2011. № 6. С. 5—17.
4. **Unsolved** Problems in Mathematical Systems and Control Theory / Edited by V. D. Blondel & A. Megretski. Princeton, Oxford: Princeton University Press, 2004.
5. **Liberzon D.** Switching in Systems and Control. Boston, MA: Birkhauser, 2003.
6. **Васильев С. Н., Косов А. А.** Анализ динамики гибридных систем с помощью общих функций Ляпунова и множественных гомоморфизмов // Автоматика и телемеханика. 2011. № 6. С. 21—41.
7. **Aleksandrov A. Yu., Kosov A. A., Platonov A. V.** On the Asymptotic Stability of Switched Homogeneous Systems // Systems & Control Letters. 2012. V. 61, N. 1. P. 127—133.
8. **Vassilyev S. N., Kosov A. A., Malikov A. I.** Stability Analysis of Nonlinear Switched Systems via Reduction Method // Preprints of the 18th IF AC World Congress Milano. Italy. Aug. 28 — Sept. 2, 2011. P. 5718—5723.
9. **Александров А. Ю., Косов А. А., Платонов А. В., Фадеев С. С.** Об устойчивости и стабилизации механических систем с переключениями силовых полей // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 12. С. 9—16.
10. **Черноусько Ф. Л., Ананьевский И. М., Решмин С. А.** Методы управления нелинейными механическими системами. М.: Физматлит, 2006. 328 с.
11. **Зубов В. И.** Математические методы исследования систем автоматического регулирования. Л.: Машиностроение, 1974. 336 с.
12. **Rosier L.** Homogeneous Lyapunov function for homogeneous continuous vector field // Systems & Control Letters. 1992. V. 19. P. 467—473.

A. A. Kosov, Leading researcher, aakosov@yandex.ru,
Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

Design of Stabilizing Control for One Switching Mechanical System

The controlled mechanical system consisting of finite number of the masses moving along one straight line, interacting among themselves by means of switched elastic forces and being under the influence of switched dissipative forces is studied. The problem of stabilization of equilibrium position for finite time in this mechanical system at any mode of switchings is considered. A simple feedback law is offered where the control force affecting each mass depends only on the coordinate and on the speed of movement of this mass. This control law guarantees the system to come to the equilibrium position for finite time from any initial situation in a small vicinity of equilibrium with the subsequent fixation at any mode of switchings for elastic and dissipative forces. Justification is carried out with use of the common Lyapunov function and theorems of stability of systems with switchings on generally homogenous approximation. As an example, the system of two interacting carts is considered. Modeling of the closed loop system confirms reduction in the equilibrium position for finite time.

Keywords: *hybrid mechanical systems, control, stabilization, Lyapunov function*

References

1. **Shorten R., Wirth F., Mason O., Wulf K., King C.** Stability Criteria for Switched and Hybrid Systems. SIAM Rev. 2007. V. 49, N. 4. P. 545—592.
2. **Hai Lin, Antsaklis P. J.** Stability and Stabilizability of Switched Linear Systems: a Survey of Recent Results. *IEEE Trans. Automat. Contr.* 2009. V. 54. N. 2. P. 308—322.
3. **Aleksandrov A. Yu., Kosov A. A., Chen Yangzhou.** Stability and stabilization of mechanical systems with switching. *Autom. Remote Control.* 2011. V. 72, N. 6. P. 1143—1154.
4. **Unsolved** Problems in Mathematical Systems and Control Theory. Edited by V. D. Blondel & A. Megretski. Princeton, Oxford: Princeton University Press, 2004.
5. **Liberzon D.** Switching in Systems and Control. Boston, MA: Birkhauser, 2003.
6. **Vassilyev S. N., Kosov A. A.** Analysis of hybrid systems' dynamics using the common Lyapunov functions and multiple homomorphisms. *Autom. Remote Control* 2011. V. 72, N. 6. P. 1163—1183.
7. **Aleksandrov A. Yu., Kosov A. A., Platonov A. V.** On the Asymptotic Stability of Switched Homogeneous Systems. *Systems & Control Letters.* 2012. V. 61, N. 1. P. 127—133.
8. **Vassilyev S. N., Kosov A. A., Malikov A. I.** Stability Analysis of Nonlinear Switched Systems via Reduction Method. *Preprints of the 18th IFAC World Congress* Milano. Italy. Aug. 28 — Sept. 2, 2011. P. 5718—5723.
9. **Aleksandrov A. Yu., Kosov A. A., Platonov A. V., Fadeev S. S.** Ob ustoychivosti i stabilizatsii mekhanicheskikh sistem s pereklyucheniyami silovykh poley. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie.* 2013. N. 12. P. 9—16.
10. **Chernous'ko F. L., Anan'evskiy I. M., Reshmin S. A.** Metody upravleniya nelineynymi mekhanicheskimi sistemami. M.: Fizmatlit, 2006. 328 p.
11. **Zubov V. I.** Matematicheskie metody issledovaniya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya. L.: Mashinostroenie, 1974. 336 p.
12. **Rosier L.** Homogeneous Lyapunov function for homogeneous continuous vector field. *Systems & Control Letters.* 1992. V. 19. P. 467—473.

УДК 159.9.01

С. Ф. Сергеев, д-р психол. наук, проф., ssfpost@mail.ru,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Механизмы аутопоэтической самоорганизации и проблемы управления в технобиосфере

Рассматриваются проблемы управления, возникающие в результате коэволюции техногенной среды, человека и социума. Предложена концепция тотальной аутопоэтичности человекоразмерных систем. Дана интерпретация работы механизмов аутопоэтической самоорганизации в процессах развития глобальной техногенной среды и человека.

Ключевые слова: *аутопоэзис, коэволюция, проектирование, самоорганизация, сознание, технобиод, техногенный мир, управление*

Введение

В настоящее время в инженерной среде наблюдается устойчивый интерес к эргономическим и инженерно-психологическим исследованиям и моделям, связанным с учетом человеческого фактора при проектировании сложных искусственных техногенных сред и эргатических систем. Гуманитарный уклон в инженерном труде не случаен и обусловлен, в известной мере, усталостью научно-технической общественности от классической механистической парадигмы проектирования техники, основанной на математических моделях и физических аналогиях. Возможности данного подхода, реализующего идеи и методологию классической рациональности, практически исчерпаны. Современный мир, являющийся миром организованной сложности, не может быть создан только на основе формального подхода, ведущего к чрезмерной математизации и редуцированным формам описаний сложных систем. Простых каузальных моделей и алгоритмов явно недостаточно для отражения реальной сложности современного мира человеком, сознание которого не приспособлено для этого и противится любым изменениям, нарушающим простоту и логичность личностного мировосприятия.

Можно говорить о возникновении в технических науках антропогенного системного кризиса, связанного с желанием человека управлять всеми процессами и явлениями сложного мира и его ограниченными возможностями по работе с организованной сложностью, возникающей в техногенной среде человеческой цивилизации. Вместе с тем, мы наблюдаем в живой природе и обществе тотальное действие активных самоорганизующихся процессов кооперативной и социальной природы, ведущих к появлению организованного мира. Все это является источником идей эволюционного развития и самоорганизации, перенос которых на техническое проектирование является перспективным трендом инженерного знания (В. А. Виттих, А. В. Голубин, В. В. Емельянов, В. М. Курейчик, В. Г. Редько, В. Б. Тарасов и др.).

Развитие технонауки связывают с ожиданием появления новых возможностей человечества в точке технологической сингулярности, подготовленной развитием настоящего этапа техники и технологии. Одновременно существуют и растут опасения, связанные с возможным негативным влиянием компьютерных технологий на психическую сферу и здоровье человека.

Отметим, что базовые принципы, лежащие в основе технофеномена человека, технонауки и технологии, приводящие к уникальным возможностям человечества по целенаправленному влиянию на природу и общество, к настоящему времени изучены недостаточно. Несмотря на большой объем полученного в естественных и гуманитарных науках знания, мы по-прежнему плохо представляем себе природу творческой и созидательной активности и продуктивности человека и общества, ведущих к созданию современного варианта техногенного мира. Попытаемся частично восполнить данный пробел, применяя постнеклассические системные представления, развитые в биологии, психологии и социологии, связанные, прежде всего, с самоорганизующимися системами аутопоэтического типа (У. Матурана, Ф. Варела, Н. Луман).

Основным методом, использованным в данной статье, послужил теоретический анализ проблемы эволюции человека и психики в условиях развития техногенной среды с точки зрения, развиваемой автором постнеклассической версии инженерной психологии и эргономики. Это направление ориентировано на проектирование сложных эргатических систем и сред и основано на методологических положениях эпистемологического и радикального конструктивизма [1, 2]. Базовые положения и теоретические схемы конструктивизма довольно полно изложены в работах отечественных и западных представителей синергетического подхода (В. И. Арши-

нов, В. Г. Буданов, Е. Н. Князева, С. П. Курдюмов, В. А. Лекторский, Н. Луман, У. Матурана, Г. Рот, Ж. Пиаже, В. С. Стёпин, Х. фон Фёрстер и др.).

Системно-эпистемологический базис техногенной эволюции

С точки зрения классической естественной науки живая система — это довольно странная вещь, суть которой состоит в появлении после рождения самоподдерживающегося циклического процесса ("вихря самоорганизации"), ведущего к возникновению существующей во времени и пространстве фиксированной организации исторического типа, проявляющей свойства динамической системы с переменными структурой, функциями и элементами. Такие системы Хайнц фон Фёрстер (Heinz von Foerster) относил к кибернетическим системам второго порядка (наблюдающие системы) [3], а Умберто Матурана (H. Maturana) и Франсиско Варела (F. Varela) — к аутопоэтическим системам [4].

Суть существования данных системных образований заключается в непрерывном рекурсивном процессе самовоспроизведения цепей (сетей) процессов, порождающих их и их элементы, называемом аутопоэзисом ("autopoiesis" — самопорождение, самосотворение, самопроизводство) (см. рисунок на третьей стороне обложки).

Возникающее динамическое системное единство (аутопоэтическая система) существует как результат непрерывного, рекурсивного циклического изменения в зоне своего существования замкнутых на порождение самое себя процессов различной физической и информационной природы. Следует подчеркнуть, что аутопоэтическая система воспроизводит себя в каждом последующем цикле не абсолютно точно, а с учетом изменения внутренних и внешних состояний системы, происходящих в рамках границ, допускающих продолжение существования системы (системный дрейф).

Матурана и Варела определяют аутопоэтическую систему следующим образом: "это система, организованная (определена как единство) как сеть процессов производства (трансформации и разрушения) компонентов, которые производят эти компоненты. Одновременно компоненты имеют следующие характеристики: (i) в процессе взаимодействий и превращений между собой они постоянно регенерируют и реализуют сеть процессов (отношений), которая их создала; (ii) они составляют ее (систему) как конкретное сетевое единство в пространстве, в котором они (компоненты) существуют, указывая на спецификацию топологических доменов в ее реализации в качестве такой сети" [5].

Важным для нас следствием аутопоэзиса является появление и проявление избирательных, селективных свойств живой системы по отношению к себе и среде своего существования (экологической нише). Система не может пропускать в зону самоорганизации своих внутренних операций те воздействия среды, которые могут привести к нарушению циклов аутопоэзиса. Это приведет к ее гибели. В силу этого возникает понятие операциональной замкнутости аутопоэтических систем, в соответствии с которым в данных системах могут существовать лишь только те операции, которые ведут к самовопроизводству системы и расширению области ее существования. По этим причинам аутопоэтическая система не реагирует непосредственно на неспецифическую активацию со стороны внешней среды. Ее развитие определяется преимущественно внутренними закономерностями и причинами, лежащими внутри системы. Такая система представляет собой относительно изолированный от окружающей среды по каузальной структуре фрагмент реальности. Внешняя среда не может извне определить свойства данной автономной системы, прорвать ее каузальную непроницаемость. Заметим, что операциональная замкнутость не означает полную изоляцию системы от среды, а говорит лишь об особых отношениях системы с окружающим миром.

Аутопоэтический характер системогенеза и функционирования живых организмов, по-видимому, пронизывает все уровни структурной организации живой материи (тотальная аутопоэтичность). Это ведет к появлению у животных и человека форм психического отражения и реагирования в виде информационного аутопоэтического процесса, сопровождаемого появлением ментальных понятийных структур и субъектных форм организации границ психического, сохраняющих операциональную изолированность системы от мира. Возникает внутренний субъективный мир как динамический конструкт, ведущий к сохранению биологической и психической организации человека в среде его жизнедеятельности в рамках поведения, организуемого с позиций сохранения линии жизни. Аутопоэзис субъектного компонента организма ведет к созданию и выбору конструктов, ведущих к продолжению существования системы во времени, порождает смысл и цели жизни. Таким образом, можно предположить, что возникновение сознания и форм ментального (информационного) познания и реагирования, появление субъективного мира являются закономерным следствием аутопоэтического характера функционирования всех систем живого организма.

Сознание человека также проявляет все признаки аутопоэтической системы, и все основные его свойства могут быть изложены в терминах аутопоэтической концепции в рамках синергетических и кибернетических представлений, которые довольно полно представлены в научно-практических основаниях философии эпистемологического конструктивизма. Аутопоэтическое сознание избирательно создает и исследует физические и социальные миры, порождая в ментальном пространстве человека их аналоги в субъективной форме, используя в своей конструируемой действительности только те их аспекты, которые могут усилить аутопоэтические свойства организма.

В процессе аутопоэзиса формируется субъективный мир, содержание которого не отражает рационально и беспристрастно (объективно) физический мир, а направлено на создание и продолжение истории действующей личности, описываемой субъектом и фиксируемой в его опыте. Аналогично и социальные коммуникационные системы, будучи аутопоэтическими по своей сути, также пишут историю общества, ведут к усилению вектора жизни, выступают в качестве катализатора развития человеческой цивилизации.

Важным следствием аутопоэзиса живых организмов является признание конструирующего характера человеческого сознания и психики. Психическое содержание является циклически воспроизводящим себя в среде мозга динамическим ментальным конструктом. В нем отражаются все грани опыта субъекта, ведущие к появлению, сохранению и развитию личности, становлению индивидуальности. Человек конструирует мир, конструируя себя, и имеет дело только с конструируемыми фрагментами реальности. Все, что не конструируется, выходит из сферы нашего познания и понимания. Именно с аутопоэзисом наших механизмов познания мира и связаны проблемы обучения человека и взаимопонимания. Человек, будучи аутопоэтической системой, может взаимодействовать с другими системами только в неразрушающих его аутопоэзис формах содействия и взаимной ориентации. Именно в этих способах и формах межсистемных неразрушающих взаимодействий, определяемых и допускаемых аутопоэтическим характером системной организации человека, и лежат механизмы его воздействия на природу, скрыты истоки технологических возможностей и могущества человечества. Рассмотрим это немного подробнее.

Эволюция техногенной среды и инженерные возможности человека

Человек в процессе трудовой деятельности целесообразно воздействует на природу, изменяя при этом одновременно аутопоэтический мир своей действительности и стоящую за ним физическую (либо иную другую) реальность. Заметим, что человеческая деятельность также функционирует в рамках и в виде поддерживающего себя аутопоэтического процесса. Аутопоэтический характер человеческой деятельности и ее результата — мира действительности, обусловливает их неслучайный характер. Мы живем в строго организованном и организуемом нами и технологией мире. Мир нашей действительности конструируется и организуется по законам, обеспечивающим наше самовоспроизведение и существование. Следствием изложенного может быть вывод о том, что любые изменения в мире нашей действительности, возникающие в силу активности действующего субъекта и сопровождающие их изменения физической реальности, отражают процессы коэволюции аутопоэтических систем, конструируемых нашим сознанием и воплощенных в жизнь с помощью технологий. Они представлены субъекту непосредственно в объектной (объективной) форме с реально отражаемыми в них аутопоэтически сопряженными элементами объективного (конструируемого) мира.

Из этого следует, что человек не может свободно воздействовать на физический мир, произвольно изменяя его. Конструирующая, творческая активность порождает только системы, поддерживающие аутопоэзис организма и психики. Техногенная среда как продукт деятельности человека, таким образом, всегда отражает в себе результаты конструирующего и преобразующего мир опыта человека. Она содержит в своих продуктах воплощенные в них системные свойства, позволяющие использовать их в дальнейшем в качестве искусственных элементов для конструирования новых системных аутопоэтических единств более высокого порядка, поддерживать процессы аутопоэтической самоорганизации. Создание искусственного мира, о котором так много говорят в последнее время в связи с тотальным проникновением техники и технологии в жизнь человека, в своей основе также связано с проявлением конструирующих способностей человека, пронизывающих все уровни его психической организации. Способность к конструированию, изменению в нужном направлении объектов и мира действительности является продолжением аутопоэтической организации человека, который изменяя мир, вводит его в границы своего аутопоэзиса. Инженерная деятельность в системном представлении состоит в создании элементов, поддерживающих цепи самовоспроизводства глобального системного организма, включающего технобиосферу планеты Земля. Эти элементы, представленные в виде продуктов, артефактов и технологий, обладают уникальными единичными свойствами, являясь отражением процессов самоорганизации их создателей. Мы конструируем только те фрагменты мира, которые могут вступать в цепи аутопоэтических отношений, непрерывно генерируемых человеком. В силу этого ничего случайного в организации жизни нет. Она организует среду и селектирует из нее только те элементы, которые входят в обеспечение аутопоэзиса.

В. В. Чеклецов предлагает концепцию "Разумных Ландшафтов" как метафоры постчеловеческого тела и социального пространства будущих субъектов коммуникации [6, с. 48], формируя в семи тезисах основные ее положения, в соответствии с которыми:

- граница человеческого "Я" неоднозначна и динамична. Возможно расширение ее топологии за физические границы тела;
- личность репрезентируется в интерактивной аутопоэтической среде;
- конструируемый личностью с помощью технологии "Разумный Ландшафт" может обладать искусственной перцептивной поверхностью, повышающей потенциал самоорганизации, автопоэзиса и саморазвития человека;

- "Разумный Ландшафт" интерактивен и открыт для коммуникации с другими. В нем происходит селекция новых форм социальных отношений;
- в пространстве "Разумного Ландшафта" происходят семантические процессы и процессы актуализации знаков, символов, паттернов и т. д.;
- происходят процессы производства компонентов для строительства среды и элементов тела;
- ценностные ориентиры, лежащие в основе построения "Разумных Ландшафтов", позволяют моделировать новые формы деятельностного подхода к бытию.

Нетрудно догадаться, что в концепции "Разумного Ландшафта" в метафорической форме также отражены системные эффекты аутопоэтических систем, действующих в человеческом сознании, живой природе и человеческом обществе.

Аутопоэтический характер человекоразмерных систем проявляется на всех уровнях и формах их деятельности и организации, что позволяет нам ввести принцип *тотальной аутопоэтичности* живых систем, в том числе человека и продуктов его деятельности (человекоразмерных систем).

В соответствии с этим принципом живые системы непрерывно создают цепи аутопоэзиса и вовлекают в него окружающую среду. Все, что конструируется живым организмом, носит аутопоэтический характер. Жизнь — это непрерывный аутопоэзис, вовлекающий в процессы своей эволюции только способные к аутопоэзису элементы реальности. Мы имеем дело только с аутопоэтическими системами и ни с какими иными. Например, сам факт наблюдения того или иного объекта нашей действительности свидетельствует о том, что возникла аутопоэтическая цепь "сознание — наблюдаемый объект". Свойства возникшей системы позволяют включать ее в любые отношения с другими аутопоэтическими сущностями сетевого потока сознания, формирующего действительность.

Способность к порождению только аутопоэтических процессов и систем, присущая человеку и лежащая в основе инженерной деятельности, — не столь безобидная вещь, как может показаться на первый взгляд. Новые аутопоэтические системы в процессе своей эволюции и самоорганизации могут работать в рамках собственных внутренних описаний, создавая некомфортные, а порою опасные условия для существования человека. Новая системная сущность может использовать человека как расходный элемент в цепи процессов своего самовоспроизведения, поступая с ним в логике аутопоэзиса, которая может совсем не соответствовать моральным и этическим воззрениям человечества. Заметим, что наши возможности влияния на процессы аутопоэзиса довольно ограничены. Управлять самоорганизацией непосредственно невозможно, так как это вызовет к жизни защитные механизмы системы, ограничивающие внешнее вмешательство. Можно только ориентировать конструирующие механизмы систем в целях получения требуемого поведения. Примером деструктивного влияния на человека механизмов аутопоэзиса могут быть неоднократно описанные системные эффекты, возникающие в сети Интернет в результате действия коммуникации, проявляющей свойства социальной аутопоэтической системы.

Основным механизмом, лежащим в основе конструирующих возможностей человека, является сознание. По мнению Е. Н. Князевой, "сознание — эмерджентная, сложноорганизованная и автономная сеть элементов", которая порождает квалиа в виде чувственных и ментальных образов, описывающих конструирующий опыт человека. Процессы самоорганизации сознания охватывают и увязывают воедино мозг человека, его тело и окружение. Их появление связано с возникновением "петель циклической причинности", в которых проявляется самодостраивание системы, создание реализуемого образа будущего. Возникающие и растворяющиеся в сознании варианты будущего проявляются в творчестве, мышлении и фантазиях человека. Ограничителями спонтанной активности сознания, ведущими к выбору финального результата, являются механизмы редукции [7], которые создают иллюзию раздельного существования человека и мира, который представлен субъекту в виде независящей от него "объективной реальности". Возникает возможность проверки "соответствия" моделей сознания объективному миру, в процессе которой отбираются наиболее адекватные с точки зрения обеспечения жизнеспособности варианты.

Человек в рамках техногенной эволюции

Любая аутопоэтическая система создает в процессе своей жизнедеятельности искусственную среду, в которой появляются аутопоэтические единства более высокого порядка, которые сразу после своего рождения начинают включать в циклы самовоспроизведения элементы предыдущих систем, реализуя общий вектор продолжения жизни. Спецификой современного технологического этапа развития человеческой цивилизации является интенсивный рост техногенной среды и появление первых признаков ее самоорганизации. Особую роль в возникающем единстве человека и технологии играет коммуникация, определяющая процессы межсистемных ориентаций и сопряжений человека и системных элементов, включаемых в цепи отношений.

Будучи аутопоэтической системой, человек существует в неразрывном процессе структурного сопряжения со средой своего существования, которая до последнего времени была только источником нужных для самовоспроизводства и существования организма веществ и информации.

Появление на планете Земля искусственной техногенной среды с нервной системой и мозгом в виде сети Интернет сопровождается процессами ее организации и эволюции, превращением в новую аутопоэтическую систему планетарного масштаба — технобиод [8], в обеспечении процесса функционирования которого участвуют все жители планеты как

пользователи, вступающие в коммуникацию с сетью. Активным организующим фактором этого образования является циклическая рекурсивная коммуникация в информационно-коммуникационной среде сети Интернет, а исполнительными элементами — человек и управляемые посредством и с помощью компьютерных технологий машины и механизмы.

Технобиод становится самостоятельным системным объектом, в котором роль индивидуального человеческого разума постепенно уходит на второй план. Человек отделяется от природы, становится элементом эволюционирующего искусственного техногенного мира. Одновременно наблюдается и начало активного процесса внедрения в человеческое тело технологий, модифицирующих человеческий организм, связывающих его с системами мониторинга и контроля. Индивидуальное поведение и активность человека теряют определяющее значение для процессов развития технобиода. Человек становится регулируемым и регулирующим элементом нового планетарного системного единства [8].

Технологии технобиотического мира

Развитие существующих и появление новых компьютерных и информационных технологий, использующих сетевые технологии и сетевое содержание, создают базис для эволюции технобиода. К ним относятся технологии, описываемые в терминах NBICS-конвергенции, и широкий комплекс глобальных прикладных инженерных дисциплин и проектов — "промышленный интернет" (Industrial Internet), "киберфизические системы" (Cyber-Physical Systems), "промышленность 4.0" (Industrie 4.0), "умный дом", "умный город", "разумная среда" (Smart Environments), "мультимодальные интерфейсы" (Multimodal Interfaces), "иммерсивные среды, интерфейсы и технологии", "технологии радиочастотной тотальной идентификации (RFID)", "программируемая материя" (Programmable matter), популярный ныне в инженерной среде "интернет вещей" (Internet of Things — IoT) и т. д.

Все перечисленное отражает взрывообразно развивающуюся тенденцию к тотальному охвату всепроникающими компьютерными системами и технологиями контроля и управления всех сфер и сред существования и жизнедеятельности человека при одновременном повышении автономности и независимости от человека самой искусственной технической среды. Так, например, M. W. Maier предлагает архитектурные принципы создания киберфизических систем, основанных на эволюционных принципах развития, включающих пять ключевых характеристик:

- независимость функционирования компонентов системы;
- управленческую независимость компонентов системы;
- географическую распределенность;
- развивающееся поведение;
- эволюционирующие процессы развития [9].

В обзоре В. А. Бородина представлено описание технологического базиса интернета вещей и сопутствующих ему технологий "облачных" и "туманных" вычислений, отражающих эволюцию информационно-сетевых и коммуникационных технологий. Основными проблемами, по мнению автора, являются "технические проблемы перехода на протокол IPv6, проблемы кибербезопасности, отсутствие стандартов, обеспечивающих защиту личной информации, управление устройствами сетевого подключения и вопросы электропитания датчиков".

Вместе с тем, следует заметить, что это далеко не самое важное в таких сложных системах, обладающих заложенным в них потенциалом и возможностями аутопоэтической самоорганизации. Проблемы скрытого управления и вероятность появления эффектов деструктивной циклической самоорганизации в социотехнических системах с абсолютной памятью более серьезны и опасны, чем техническая реализация тотально связанного мира. Система с абсолютной памятью, элементом которой становится интернет вещей, создает условия для появления опасных для общества и человека состояний техносферы. Важным элементом в отношениях с техногенной средой становится реализация принципа предосторожности, в соответствии с которым необходим контроль за технологиями в процессе их развития в целях оценки их соответствия положениям техно- и биоэтики.

Заключение

Развитие техногенного этапа эволюции человеческой цивилизации ведет к появлению сложных технических систем и сред, включающих человека в особые системные и межсистемные формы отношений. Они не сводимы к принятым в классических технических науках и инженерной практике отношениям управления, в которых имеется только один центр активности и принятия решений. В новых системах организованной сложности может существовать множество центров управления, в том числе и включающие в качестве источника команд самореферентные операционально замкнутые самоорганизующиеся системы искусственного происхождения.

На основании системно-методологического и теоретического анализа, проведенного в данной работе, можно сделать следующие выводы:

- развитие техногенной среды и компьютерных сетей и технологий тесно связано с тотальным аутопоэтическим характером человеческого организма и психики, определяющим созидательную деятельность человека и особые свойства ее продуктов, ведущие к неизбежному созданию организованной эволюционирующей техногенной (технобиотической) среды;
- эволюция техногенной среды ведет к появлению глобального эволюционирующего самоорганизующегося единства — технобиода, действующего как единый организм, включающий в цепи

своего самовоспроизводства элементы небиологической природы;

- возникающие в технобиотическом единстве цепи отношений, в силу их самоорганизующегося характера, ускользают от непосредственного контроля создателей, что может приводить к негативным по отношению к человеку (группам людей) эффектам;
- задача техногуманитарного знания в настоящий момент состоит в необходимости тщательного анализа, психологической, научно-философской и технической рефлексии системных качеств зарождающегося на наших глазах технобиотического этапа человеческой цивилизации и биосферы Земли;
- требуется проведение экспертизы глобальных последствий изменений, возникающих в техногенной среде, особенно в ее интерфейсных элементах, обеспечивающих межсистемные отношения и интеграцию человека в технобиотическую среду;
- связи с проявлением описанного выше эффекта тотальной аутопоэтичности жизни, ее экспансивного характера приобретает значение изучение процессов формирования и взаимоориентации обучающих и культурных компьютерных сред, возникающих в рамках внутрисетевых коммуникаций;
- в процессе проектирования сложных эргатических систем важно: выделить и оценить операциональные свойства возникающих в их среде циклических коммуникаций; выделить создающие их цепи аутопоэзиса, их операциональный состав, формирующий дискурсные поля организации; определить системные свойства возникающих социальных групп и их членов, включенных в техногенную среду;
- при конструировании технических систем необходимо учитывать изменение свойств технических объектов при их переходе от создателя к пользователю в новые операциональные отношения, связанные с процессами самоорганизации сложных техногенных компьютеризированных сред.

Список литературы

1. **Лекторский В. А.** Можно ли совместить конструктивизм и реализм в эпистемологии // Конструктивизм в теории познания. М.: ИФРАН, 2008. С. 36—37.
2. **Князева Е. Н.** Эпистемологический конструктивизм // Философия науки. Вып. 12. Феномен сознания. М.: ИФРАН, 2006. С. 133—153.
3. **Foerster H. von.** Cybernetics of Cybernetics, or the Control of Control and Communication of Communication. Urbana (IL): Univ. of Illinois Press (Biological Computer Laboratory), 1974.
4. **Varela F., Maturana H., Uribe R.** Autopoiesis: the organization of living systems, its characterization and a model // Biosystems. 1974. V. 5. P. 187—196.
5. **Maturana H., Varela F.** Autopoiesis and Cognition. The Realization of the Living. Boston: D. Reidel Publishing Company, 1980.
6. **Чеклецов В. В.** Топологическая версия постчеловеческой персонологии: к разумным ландшафтам // Философские науки. 2010. № 6. С. 36—53.
7. **Сергеев С. Ф.** Проблема редукции в когнитивном механизме сознания // Проблема сознания в междисциплинарной перспективе / Под ред. В. А. Лекторского. М.: Канон+, РООИ "Реабилитация", 2014. С. 245—254.
8. **Сергеев С. Ф.** Рефлексивная автоэволюция глобальных интеллектных техногенных сред // Рефлексивные процессы и управление. Сб. матер. IX Междунар. симпозиума 17—18 октября 2013 года, Москва; Отв. ред. В. Е. Лепский. М.: Когито-Центр, 2013. С. 245—248.
9. **Maier M. W.** Architecting Principles for System of Systems // Systems Engineering. 1998. N. 4. V. 1. P. 267—284.

S. F. Sergeev, Professor, ssfpost@mail.ru,
St. Petersburg Polytechnic University Mechanisms

Mechanisms Autopoietic Self-Organization and Control Problems in Technobiosphere

The article deals with the problem of co-evolution of computer man-made environment, and human society. We discuss the new information and computer networking technologies impact on people and society. We show how to technobiotics stage in the evolution of human civilization occurs. We introduce the concept of total human-autopoetics systems, according to which the autopoietics type of systemogenesis and functioning of living organisms permeates all levels of structural organization of living matter, and organized its environment and elements. We propose the author's interpretation of processes arising in man-made environment (includes human and social phenomena autopoietic self organization). We explain the mechanism of constructing and structuring influence on the development of autopoezisa global man-made environment and humans. A special place in the article dedicated to the discuss of the autopoietic systems properties in a planetary scale (the planet shown as a tehnobiod includes all human beings of planet Earth, which come into communication with the Internet). The organizing factor of this formation is a cyclic recursive communication in information and communications environment, and a people obtained the actors positions, with the help of computer technology machinery. We also show the emergency of the effects of global changes examination. These effects occur in a self-organizing and man-made environment, especially in the interface elements for integrating human in technobiotics environment.

Keywords: *autoevolution, autopoiesis, design, self-organization, coevolution, consciousness, technobiod, man-made world, control*

References

1. **Lektorskii V. A.** Mozhno li sovmestit' konstruktivizm i realizm v epistemologii. *Konstruktivizm v teorii poznaniya.* M.: IFRAN, 2008. P. 36—37.
2. **Knyazeva E. N.** Epistemologicheskii konstruktivizm. *Filosofiya nauki.* Iss. 12. *Fenomen soznaniya.* M.: IFRAN, 2006. P. 133—153.
3. **Foerster, H. von.** Cybernetics of Cybernetics, or the Control of Control and Communication of Communication. Urbana (IL): Univ. of Illinois Press (Biological Computer Laboratory), 1974.
4. **Varela F., Maturana H., Uribe R.** Autopoiesis: the organization of living systems, its characterization and a model. *Biosystems.* 1974. V. 5. P. 187—196.
5. **Maturana H., Varela F.** Autopoiesis and Cognition. The Realization of the Living. Boston: D. Reidel Publishing Company, 1980.
6. **Chekletsov V. V.** Topologicheskaya versiya postcheloveche-skoi personologii: k razumnym landshaftam. *Filosofskie nauki.* 2010. N. 6. P. 36—53.
7. **Sergeev S. F.** Problema reduktsii v kognitivnom mekhanizme soznaniya. *Problema soznaniya v mezhdistsiplinarnoi perspektive.* Pod red. V. A. Lektorskogo. M.: Kanon+, ROOI "Reabilitatsiya", 2014. P. 245—254.
8. **Sergeev S. F.** Refleksivnaya avtoevolyutsiya global'nykh intellektnykh tekhnogennykh sred. *Refleksivnye protsessy i upravlenie. Sbornik materialov IX Mezhdunarodnogo simpoziuma 17—18 oktyabrya 2013 goda, Moskva;* Otv. red. V. E. Lepskii. M.: Kogito-Tsentr, 2013. P. 245—248.
9. **Maier M. W.** Architecting Principles for System of Systems. *Systems Engineering.* 1998. N. 4, V. 1. P. 267—284.

ЭЛЕКТРО ПРИБОР

Весной 2015 г. в Санкт-Петербурге на базе ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор" состоятся конференции:

◆ **с 17 по 20 марта 2015 г.**

XVII конференция молодых ученых "НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ" (XVII КМУ 2015)

Тематика конференции

- Гироскопические системы
- Чувствительные элементы систем навигации и управления
- Микромеханические датчики, системы и технологии
- Интегрированные и спутниковые навигационные системы
- Теория и системы управления
- Прикладные задачи навигации и управления движением
- Интеллектуальные системы навигации и управления
- Обработка информации в навигационных системах
- Обработка информации в гидроакустике и радиолокации
- Электронные и электромеханические устройства систем навигации и управления
- Современные технологии в точном приборостроении
- Информационные технологии на предприятиях навигационного приборостроения

Подробную информацию о конференции см. на сайте: http://www.elektropribor.spb.ru/kmu2015/subj

◆ **с 25 по 27 мая 2015 г.**

XXII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (XXII МКИНС 2015)

Тематика конференции

- Инерциальные датчики, системы навигации и ориентации
- Микромеханические датчики и системы на их основе
- Глобальные навигационные спутниковые системы
- Альтернативные навигационные системы и датчики
- Системы управления, наведения и их элементы
- Интегрированные системы навигации и управления движением

Подробную информацию о конференции см. на сайте: http://www.elektropribor.spb.ru/icins2015/rindex

УДК 62-526

А. М. Романов[1], канд. техн. наук, программист, AlexRomashka@yandex.ru,
А. К. Петровская[2], программист, Anastasia.Petrovskaya@br-automation.com,
Б. В. Слащёв[1], программист, slaschov.bogdan@.yandex.ru,
[1] Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики,
[2] ООО "Б + Р"

Исследование возможностей адаптации современных сервоприводов переменного тока для управления двигателями постоянного тока

Рассматривается путь решения проблемы отсутствия на рынке современных электроприводов постоянного тока для двигателей мощностью более 300 Вт. На примере инверторов B&R ACOPOS предлагается методика подключения и настройки сервоприводов переменного тока для управления коллекторными двигателями постоянного тока. Приводятся результаты эксперимента, показывающего эффективность предложенной методики.

Ключевые слова: *сервоприводы, двигатели постоянного тока, инвертор, настройка приводов, векторное управление*

Введение

На сегодняшний день наибольшее распространение в промышленности получили синхронные двигатели с постоянными магнитами. По своим характеристикам они не только не уступают, но и в большинстве случаев превосходят обычные двигатели постоянного тока (ДПТ) [1]. Отсутствие коллекторно-щеточного механизма у синхронных двигателей является неоспоримым преимуществом, так как за счет отсутствия трения в щетках существенно увеличивается ресурс двигателя. В результате к началу 21 века область применения коллекторных ДПТ сузилась фактически до малоразмерных приводов мощностью до 300 Вт.

Это привело к тому, что многие производители либо перестали предоставлять решения для управления ДПТ, либо выпускают эти решения в нижнем диапазоне мощностей, как правило, не внедряя в них свои последние достижения. Так, серия модулей B&R X20 MM [2] (рис. 1, *а*, см. третью сторону обложки), позиционируемая для управления двигателями постоянного тока, позволяет управлять двигателями с максимальной мощностью порядка 200...250 Вт и максимальным током не более 6 А. В отличие от приводов семейства ACOPOS того же производителя [3] (рис. 1, *б*, см. третью сторону обложки) эти модули не имеют встроенных регуляторов и не могут являться полноценным решением для управления по скорости или положению.

В то же время, в нашей промышленности до сих пор присутствует множество техники, использующей двигатели постоянного тока. Примером могут быть советские промышленные роботы РМ-01, НЦТМ-01, НЦТМ-25, НЦТМ-30. Еще больший пласт составляют всевозможные станки, произведенные в 70—90-е годы двадцатого века и имеющие коллекторные двигатели мощностью до 5 кВт. Часто владельцы этого оборудования согласны на замену системы управления, но не согласны на замену двигателей, так как это влечет за собой изменения в механике и делает модернизацию экономически не целесообразной.

Отдельный интерес к мощным ДПТ присутствует в театральной технике, так как ДПТ определенных моделей имеют более низкий уровень шума по сравнению с синхронными двигателями аналогичной мощности.

Во всех упомянутых выше случаях требуется реализовать замкнутое управление с обратными связями по току, скорости и положению, обеспечивающее движение рабочего органа сложной кинематической системы по заданной траектории.

Присутствующие на рынке решения для управления ДПТ в большинстве своем не имеют встроенных генераторов траектории, регуляторов положения и интерфейсов подключения к современным высокоскоростным полевым шинам, таким как EtherCat и Ethernet Powerlink. Также присутствуют существенные ограничения по подключению цифровых датчиков положения. Все это делает их малопригодными для решения сложных задач контурного управления.

В то же время на рынке широко представлены блоки управления синхронными двигателями на базе векторного управления. В отличие от решений для

ДПТ сервоприводы переменного тока имеют полный набор средств для обеспечения движения по сложным траекториям с высокой точностью. Они оснащаются самыми современными интерфейсами и доступны в широком диапазоне мощностей от сотен ватт до десятков и даже сотен киловатт.

Регуляторы приводов переменного тока имеют избыточную структуру по отношению к управлению ДПТ, что открывает потенциальную возможность их адаптации для решения задач управления коллекторными двигателями.

Таким образом, актуальным является исследование возможностей адаптации векторных сервоприводов переменного тока для управления ДПТ.

Принцип управления двигателями постоянного тока с помощью приводов с векторным управлением

На сегодняшний день в задачах управления по положению наибольшее распространение получили синхронные двигатели переменного тока. В связи с этим в данной статье будет рассмотрен вопрос адаптации для управления ДПТ именно сервоприводов переменного тока, предназначенных для управления синхронными двигателями. В то же время, изложенные ниже принципы носят достаточно общий характер и при необходимости могут быть использованы для адаптации устройств, предназначенных для управления асинхронными двигателями.

Большинство приводов переменного тока реализуют так называемое векторное управление. Этот алгоритм основан на применении векторных преобразований Парка и Кларк [4, 5], которые позволяют управлять нелинейными двигателями переменного тока с помощью линейных ПИ регуляторов. Обобщенная структурная схема векторного регулятора тока [5] синхронного двигателя представлена на рис. 2.

Токи i_U и i_V, измеренные на фазах двигателя, поступают на блок преобразования Кларк, где происходит их преобразование к токам i_α и i_β эквивалентной двухфазной машины. Для трехфазных машин преобразование Кларк вычисляется следующим образом:

$$\begin{cases} i_\alpha = i_U; \\ i_\beta = \dfrac{1}{\sqrt{3}} i_U + \dfrac{2}{\sqrt{3}} i_V. \end{cases} \quad (1)$$

В случае управления двухфазным двигателем это преобразование вырождается до присвоения токов i_α и i_β токам i_U и i_V соответственно.

Токи, полученные после преобразования Кларк, поступают на вход блока преобразования Парка, сутью которого является преобразование токов из неподвижной системы координат статора во вращающуюся систему координат, связанную с угловым положением магнитного поля ротора (углом коммутации) φ_r. У синхронных двигателей с постоянными магнитами вектор магнитного поля ротора определяется пространственным расположением постоянных магнитов и линейно связан с углом положения ротора. При управлении асинхронными двигателями угол φ_r вычисляется на основании мгновенных значений токов и напряжений с помощью нелинейного наблюдателя, например, на базе расширенного фильтра Калмана [6].

В результате преобразования Парка получаются токи i_d и i_q, значения которых вычисляются следующим образом:

$$\begin{cases} i_d = i_\alpha \cos\varphi_r + i_\beta \sin\varphi_r; \\ i_q = -i_\alpha \sin\varphi_r + i_\beta \cos\varphi_r. \end{cases} \quad (2)$$

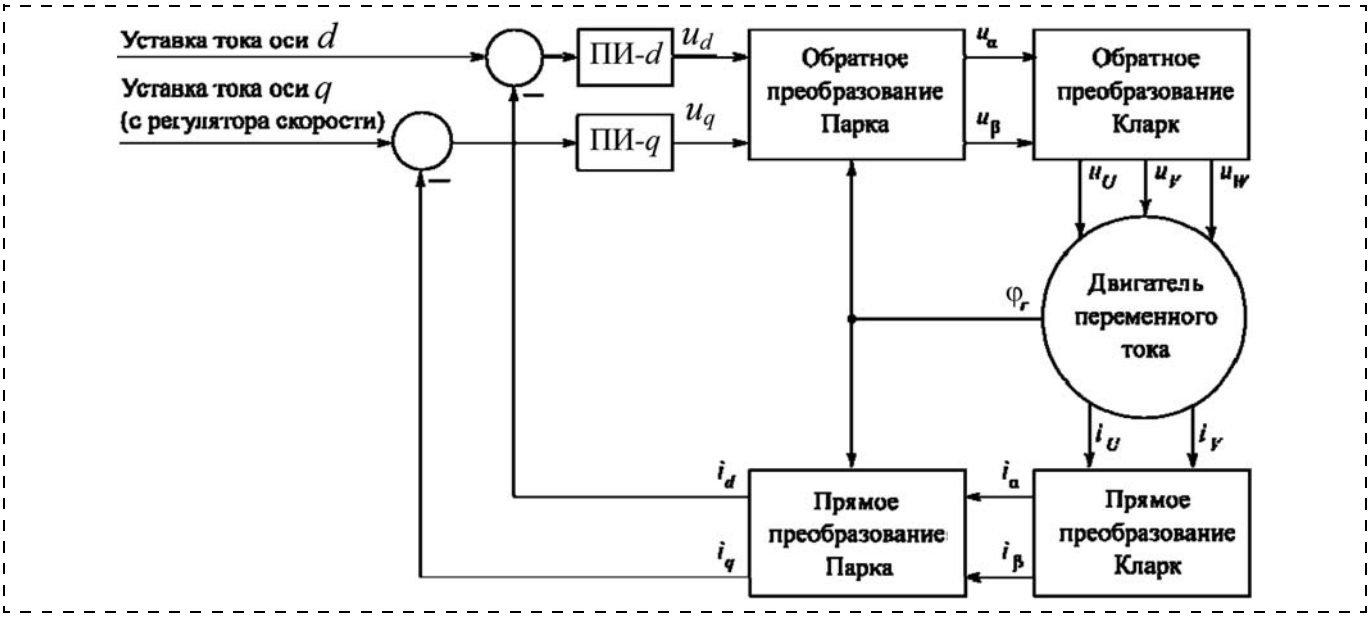

Рис. 2. Обобщенная структурная схема векторного регулятора тока

Токи i_d и i_q взаимно перпендикулярны и каждый из них может стабилизироваться с помощью отдельного регулятора. Как правило, для этих целей используются линейные ПИ регуляторы (ПИ-q и ПИ-d на рис. 2) [5]. Важной особенностью полученных токов является тот факт, что ток i_q определяет электромеханический момент на выходе двигателя, а ток i_d влияет на магнитное поле ротора, не создавая при этом никакого момента. В системах на базе синхронных двигателей выход регулятора контура скорости подключают к входу регулятора ПИ-q, а ток i_d пытаются поддерживать в окрестности нуля. При управлении асинхронными двигателями отличие состоит в том, что ток i_d используется для создания магнитного поля ротора и его уставка отлична от нуля.

На выходе регуляторов ПИ-d и ПИ-q формируются управляющие напряжения в системе координат ротора. Далее с помощью обратного преобразования Парка (1), а в случае трехфазных машин — еще и преобразования Кларк (2), они переводятся сначала в систему координат статора эквивалентной двухфазной машины, а потом в систему координат двигателя. В дальнейшем полученные значения напряжений формируются на выходе усилителя мощности привода и поступают на обмотки двигателя:

$$\begin{cases} u_\alpha = u_d \cos\varphi_r - u_q \sin\varphi_r; \\ u_\beta = u_d \sin\varphi_r + u_q \cos\varphi_r, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_U = u_\alpha; \\ u_V = -\frac{1}{2} u_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} u_\beta; \\ u_W = -\frac{1}{2} u_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} u_\beta. \end{cases} \quad (2)$$

Для управления ДПТ нужен один ПИ регулятор в случае двигателя с постоянными магнитами и два ПИ регулятора для случая двигателя с обмоткой возбуждения. Нетрудно заметить, что в структуре векторного управления (рис. 2) присутствуют два независимых ПИ регулятора, однако они с обеих сторон окружены векторными преобразованиями. Таким образом, задача адаптации привода с векторным управлением к ДПТ сводится к тому, чтобы нейтрализовать влияние преобразований Парка и Кларк. Для управления ДПТ достаточно, чтобы значение тока якорной обмотки поступало в обратную связь регулятора тока оси q (так как именно на этот регулятор приходит уставка с контура скорости), а выход этого регулятора использовался для формирования напряжения якоря.

Наиболее простым способом нейтрализации влияния преобразования Кларк является перевод сервопривода в режим управления двухфазным двигателем. В этом случае, как упоминалось выше, преобразование Кларк, по сути, отключается.

Теперь рассмотрим, что произойдет, если в системе векторного управления двухфазным двигателем угол поворота поля ротора φ_r, поступающий на вход прямого и обратного преобразований Парка, станет тождественно равен нулю.

В этом случае большая часть преобразований упрощается, и токи i_d и i_q становятся тождественно равными токам i_U и i_V, измеренным непосредственно на фазах двигателя. Аналогично, управляющие напряжения u_U и u_V, формируемые на обмотках двигателя, становятся равными напряжениям u_d и u_q.

Теперь, если подключить якорную обмотку ДПТ к фазе V привода, то система управления будет штатно функционировать, не заметив подмены синхронного двигателя на ДПТ.

В случае, если в сервоприводе допустима установка уставки на регулятор тока i_d, отличной от нуля, появляется возможность управления током обмотки

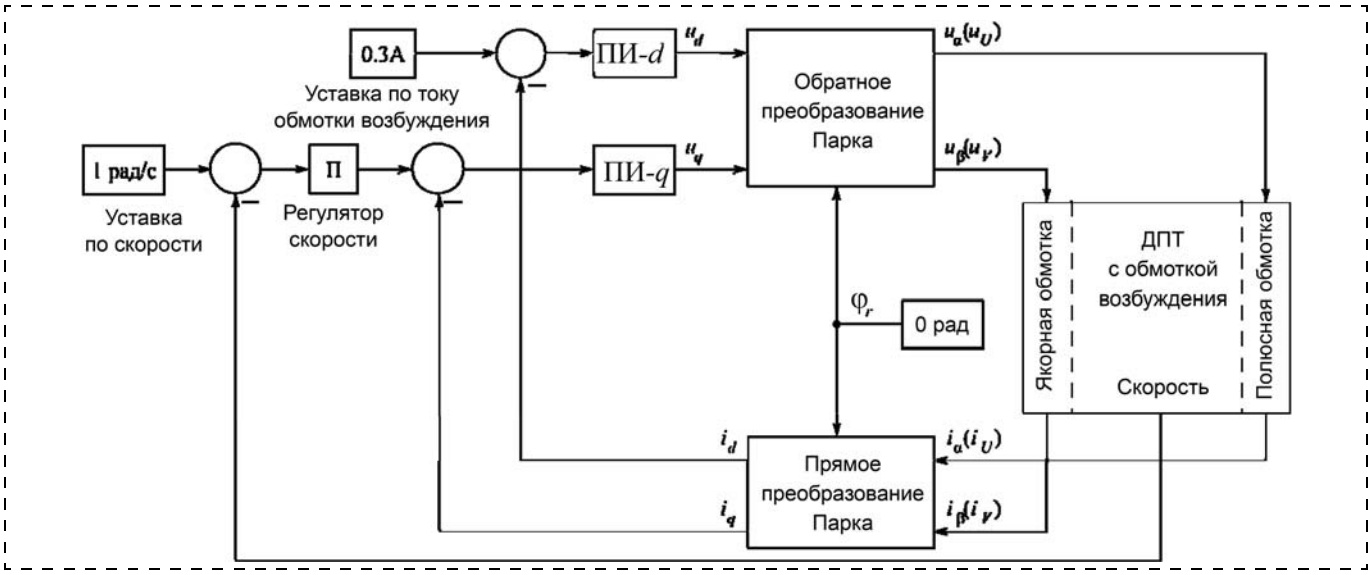

Рис. 3. Структурная схема модели управления ДПТ с помощью векторного регулятора

возбуждения, подключенной к фазе U, с помощью регулятора ПИ-d.

Для проверки предложенного способа управления ДПТ было проведено компьютерное моделирование. Структурная схема модели представлена на рис. 3. Параметры модели двигателя представлены ниже:

Параметры модели ДПТ

Полезная мощность (P2), кВт	1
Номинальное напряжение обмоток, В	110
Номинальная скорость, мин$^{-1}$	4000
КПД, %	71,5
Сопротивление якорной обмотки, Ом	0,6
Индуктивность якорной обмотки, мГн	12
Сопротивление полюсной обмотки, Ом	365
Индуктивность полюсной обмотки, Гн	7,3
Момент инерции вала двигателя, кг · м^2	0,001

Так как большинство сервоприводов не поддерживает раздельную настройку регуляторов тока ПИ-q и ПИ-d, оба регулятора в ходе моделирования настраивались на управление якорной обмоткой. В итоге коэффициент пропорционального звена регуляторов тока был выбран равным 12, а коэффициент интегрального звена — равным 600. В качестве регулятора скорости использовался П регулятор с коэффициентом 1.

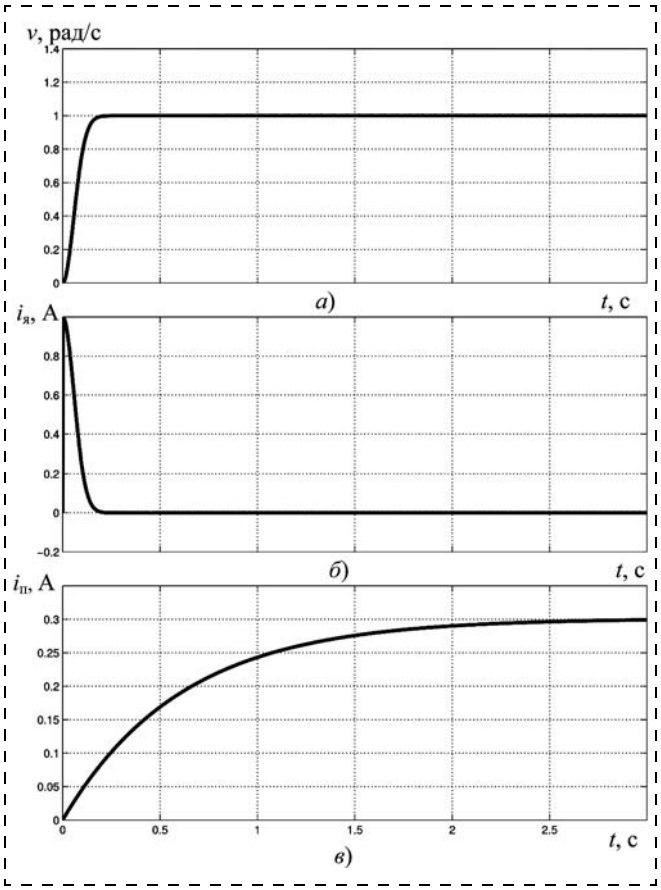

Рис. 4. Переходные процессы по скорости (*а*), току якорной обмотки (*б*) и току полюсной обмотки (*в*) ДПТ в ходе управления с помощью векторного регулятора

В результате моделирования были получены переходные процессы по скорости (рис. 4, *а*) и токам в обмотках двигателя (рис. 4, *б*, *в*).

Как видно, ДПТ успешно управляется с помощью векторного регулятора, обеспечивая поддержание заданной скорости. Длительный переходный процесс в полюсной обмотке обусловлен тем, что она имеет существенно большую электрическую постоянную времени по сравнению с якорной, в то время как регуляторы тока при векторном управлении, как правило, имеют общие коэффициенты, не поддерживая раздельную настройку. Последние не являются существенным ограничением, так как при независимом возбуждении ток в полюсной обмотке поддерживается постоянным, а значит, переходные процессы в нем будут проходить только в момент запуска системы.

На основании результатов моделирования можно утверждать, что для управления ДПТ от сервопривода переменного тока с векторным управлением достаточно:

- перевести сервопривод в режим управления двухфазным двигателем;
- установить угол коммутации φ_r в 0;
- подключить якорную обмотку ДПТ к точкам подключения фазы V двухфазного двигателя к сервоприводу.

Подключение двигателя постоянного тока к сервоприводу

В рамках данной статьи организация управления ДПТ с помощью системы управления двигателем переменного тока будет рассматриваться на примере приводов B&R ACOPOS. Однако описанные ниже решения могут быть применены к любому приводу переменного тока, использующему векторное управление и имеющему соответствующие возможности по настройке конфигурации и параметров регулятора тока.

Приводы B&R семейства ACOPOS предназначены для управления трехфазными двигателями переменного тока и имеют классическую для этого типа устройств схему выходного каскада усилителя: три управляемых полумоста. Подключение синхронного двигателя к приводу осуществляется путем подключения каждой фазы двигателя в среднюю точку одного из полумостов (рис. 5).

Легко заметить, что используя два из трех полумостов, можно реализовать полный мост, необходимый для реверсивного управления ДПТ с постоянными магнитами (рис. 6). В этом случае третий полумост просто остается не использованным. Диапазон напряжений, который можно создать на якорной обмотке при такой схеме включения двигателя, составляет $-U_{пит}$ ... $U_{пит}$, где $U_{пит}$ — напряжение шины постоянного тока силового каскада привода.

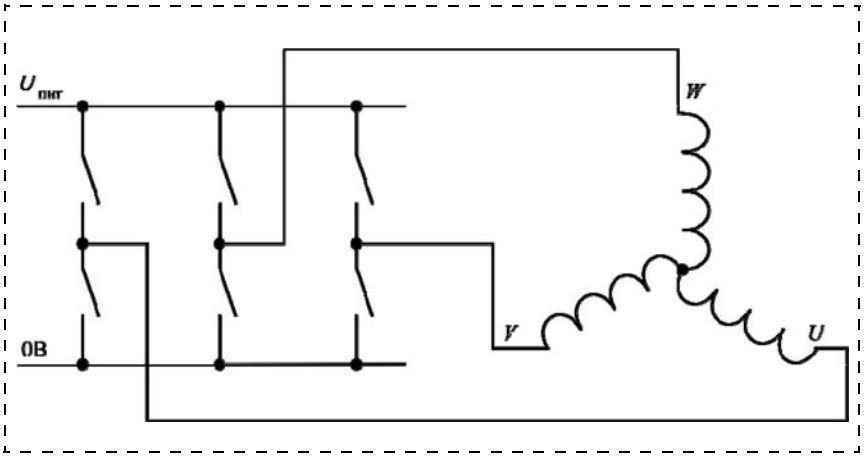

Рис. 5. Схема подключения трехфазного синхронного двигателя к приводу B&R ACOPOS

При использовании ДПТ с обмоткой возбуждения возможно подключение якорной и полюсной обмоток ДПТ ко всем трем выходным фазам привода по схеме с плавающей средней точкой (рис. 7). В этом случае диапазон возможных напряжений питания обмоток двигателя составит $-0{,}5U_{пит}...0{,}5U_{пит}$.

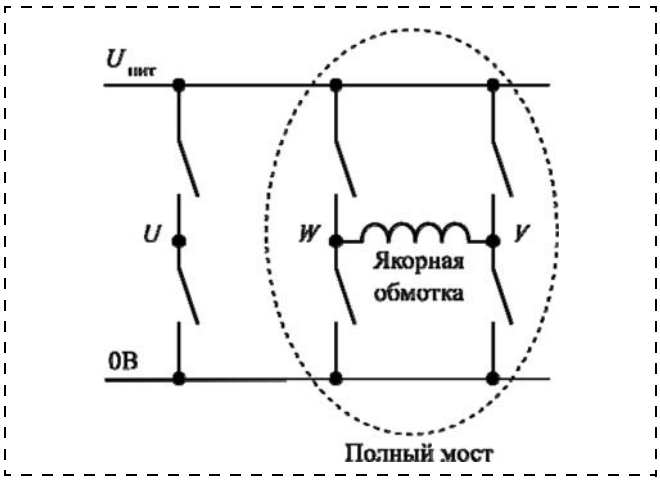

Рис. 6. Схема подключения ДПТ с постоянными магнитами к приводу B&R ACOPOS

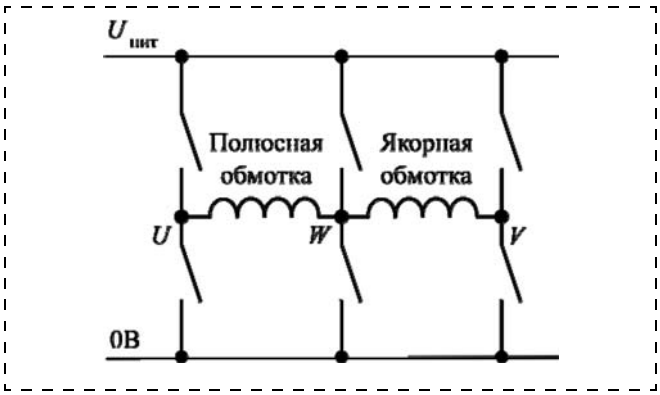

Рис. 7. Схема подключения ДПТ с обмоткой возбуждения к приводу B&R ACOPOS по схеме с плавающей средней точкой

Настройка привода B&R ACOPOS для управления двигателями постоянного тока

Первое, что требуется сделать, — это отключить контроль целостности и смещения фаз двигателя, так как эта функция привода работает, основываясь на предположении, что используется привод переменного тока. Для этого с помощью ACOPOS Parameter Table следует установить биты номер 1, 2, 3, 4 и 5 параметра MOTOR_TEST_MODE (ParID 866) в единицу.

Далее следует перевести привод в режим управления двухфазным двигателем. Для этого в параметр MOTOR_NUM_PHASES (ParID 1208) записывается значение 2. Теперь можно подключать якорную обмотку к выходам *V* и *W*, а обмотку возбуждения — к выходами *U* и *W* привода ACOPOS.

Большинство паспортных данных двигателя, которые надо указывать в ACOPOS Parameter Table при настройке, являются общими как для синхронных двигателей, так и для ДПТ, поэтому могут быть легко взяты из документации на используемый двигатель.

Также следует установить некоторые специфические для синхронных двигателей параметры:

1) число пар полюсов с использованием параметра MOTOR_POLEPAIRS (ParID 47) следует установить в единицу;

2) угол смещения датчика положения относительно системы координат угла поворота поля ротора φ_r с использованием MOTOR_COMMUT_OFFSET (ParID 63) следует установить в 0 рад;

3) режим определения угла коммутации с помощью параметра PHASING_MODE (ParID 276) следует установить в DIRECT II (4). Данный режим подразумевает использование постоянного угла смещения, установленного с помощью MOTOR_COMMUT_OFFSET, вне зависимости от типа датчика обратной связи.

Последнее, что требуется для запуска двигателя постоянного тока — это сделать угол поворота ротора, используемый в преобразованиях Парка, перманентно равным нулю. Для этого необходимо создать функциональный блок SPT типа VAR (переменные). Все переменные в созданном функциональном блоке по умолчанию равны нулю. Возьмем любую переменную с плавающей точкой из созданного блока и укажем ее ParID в параметр VCTRL_RHO_REF_PARID (ParID 847), отвечающий за угол, используемый в ходе векторных преобразований регулятора тока.

Теперь можно управлять ДПТ, используя все возможности приводов ACOPOS, включая технологию SPT и формирование сложных траекторий оси с помощью электронных кулачков.

Для управления током в обмотке возбуждения ДПТ существуют различные пути в зависимости от типа подключения. Обмотка возбуждения может быть подключена непосредственно к источнику питания через реле. В этом случае управление реле можно организовать либо с помощью 24-вольтного выхода управления тормозом привода ACOPOS, либо с помощью любой системы дискретных входов/выходов. Если же обмотка возбуждения была подключена к выходам *U* и *W* привода ACOPOS, то управление ее напряжением можно осуществить с помощью SPT, указав ParID выхода SPT блока в одном из двух параметров — VCTRL_USD_ REF_PARID (ParID 845) или ICTRL_ISD_SET_PARID (ParID 725).

Если используется параметр ICTRL_ISD_SET_ PARID, то выход блока SPT будет интерпретироваться как ток, значение которого надо поддерживать в обмотке возбуждения. Главным ограничением данного подхода является отсутствие возможности установить разные настройки для регуляторов тока фаз *d* и *q* в приводах ACOPOS, в то время как параметры якорной и полюсной обмоток ДПТ могут существенно отличаться.

В случае использования параметра VCTRL_USD_ REF_PARID выход блока SPT интерпретируется как напряжение, которое необходимо сформировать на обмотке возбуждения.

Экспериментальная проверка предложенных решений

Для проверки предложенного метода был собран стенд, включающий в себя источник питания B&R OPS 1200.1, контроллер B&R X20CP1484-1, привод B&R ACOPOS 8V 1180.00-2 с платой подключения инкрементного датчика 8AC123.60-1 и

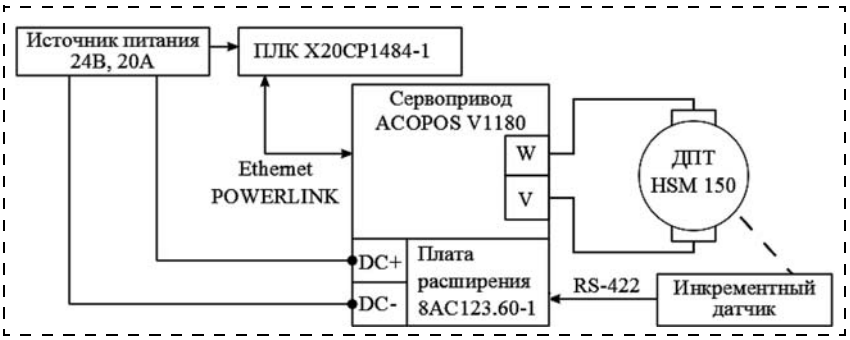

Рис. 8. Структурная схема испытательного стенда

Параметры сервопривода ACOPOS Parameter Table

Название параметра	ID	Значение	Единица	Описание
MOTOR_TEST_MODE	866	7		Мотор: режим отладки
PHASE_MON_IGNORE	80	1		Источник питания: игнорировать порядок фаз
UDC_NOMINAL	390	24	В	Шина постоянного тока: номинальное напряжение
FUNCTION_BLOCK_CREATE	777	VAR_R4_0+0		Создание функционального блока
VAR_R4_0+0	4128	0		FB0 FB VAR: Variable0 R4
VAR_R4_1+0	4136	0		FB0 FB VAR: Variable1 R4
MOTOR_TYPE	30	0x0002		Тип мотора
MOTOR_COMPATIBILITY	31	0x0203		
MOTOR_WIND_CONNECT	46	1		Тип соединения обмоток
MOTOR_POLEPAIRS	47	1		Число пар полюсов
MOTOR_VOLTAGE_RATED	48	24	В	Номинальное напряжение
MOTOR_VOLTAGE_CONST	49	5	мВ · мин	Коэффициент противоЭДС
MOTOR_SPEED_RATED	50	4000	1/мин	Номинальная скорость
MOTOR_SPEED_MAX	51	6000	1/мин	Максимальная скорость
MOTOR_TORQ_STALL	52	3	Н · м	Пусковой момент
MOTOR_TORQ_RATED	53	2	Н · м	Номинальный момент
MOTOR_TORQ_MAX	54	3	Н · м	Максимальный момент
MOTOR_TORQ_CONST	55	0.055	Н · м/А	Коэффициент передачи по току
MOTOR_CURR_STALL	56	3	А	Пусковой ток
MOTOR_CURR_RATED	57	1	А	Номинальный ток
MOTOR_CURR_MAX	58	8	А	Максимальный ток
MOTOR_WIND_CROSS_SECT	59	1	мм^2	Сечение обмотки
MOTOR_STATOR_RESISTANCE	60	10.5	Ом	Сопротивление якорной обмотки
MOTOR_STATOR_INDUCTANCE	61	0.0016	Гн	Индуктивность якорной обмотки
MOTOR_INERTIA	62	0.0001	кг · м^2	Момент инерции ротора
MOTOR_COMMUT_OFFSET	63	0	рад	Смещение угла коммутации
MOTOR_TAU_THERM	849	1000	с	Тепловая постоянная времени
VCTRL_USD_REF_PARID	845	VAR_R4_0+0		ID параметра уставки для компоненты напряжения по оси *d* векторного регулятора тока
VCTRL_RHO_REF_PARID	847	VAR_R4_1+0		Угол коммутации векторного регулятора тока
PHASING_MODE	276	4		Тип метода определения фазировки мотора
MOTOR_NUM_PHASES	1208	2		Число фаз

двигатель постоянного тока HSM 150 с инкрементным датчиком ELCIS 63-250-5-BZ-N-CI. Структурная схема испытательного стенда представлена на рис. 8.

Таблица параметров сервопривода ACOPOS была настроена согласно предложенной методике для работы с ДПТ.

Эксперимент проводился с помощью встроенного средства B&R Automation Studio [7] для настройки и проверки работы приводов NC Test. Целью эксперимента была проверка возможности управления по положению ДПТ с использованием сервопривода ACOPOS.

В ходе эксперимента проводилась автоматическая настройка регуляторов скорости и положения привода, а также осуществлялось перемещение в точки с заданным положением.

Результаты эксперимента показали, что привод B&R ACOPOS способен управлять ДПТ, сохраняя свою функциональность и обеспечивая высокое качество управления.

Заключение

На сегодняшний день на рынке практически отсутствуют специализированные решения для промышленных приводов постоянного тока мощностью более 250 Вт. Это заставляет потребителей идти на отказ от ДПТ и их дорогостоящую замену на синхронные двигатели даже в тех случаях, когда в этом отсутствует практическая целесообразность.

Предложенная методика настройки приводов переменного тока позволяет использовать все наиболее современные технологии в области управления движением при проектировании и модернизации промышленных систем на базе двигателей постоянного тока.

Список литературы

1. **Вольдек А. И., Попов В. В.** Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: Учебник для вузов. СПб.: Питер, 2007. 302 с.
2. **B&R: X20MM4456.** X20MM4456. URL: http://www.br-automation.com/ru/produktsiia/sistiemy-upravlieniia/sieriia-x20/upravlieniie-dvighatieliem/x20mm4456/, свободный. Загл. с экрана.
3. **B&R: ACOPOS.** Интеллектуальные сервоприводы. URL: http://www.br-automation.com/ru/produktsiia/upravlieniie-dvizhieniiem/acopos/, свободный. Загл. с экрана.
4. **Виноградов А. Б.** Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: Изд. Ивановского государственного энергетического университета имени В. И. Ленина, 2008.
5. **Field** Oriented Control of 3-phase AC-Motors // Lit. No. BPRA073, Texas Instruments Europe, Feb. 1998.
6. **Lin F.-J.** Robust speed-controlled induction-motor drive using EKF and RLS estimators // Electric Power Applications, IEE Proceedings. 1996. V. 143. N. 3. P. 186—192.
7. **B&R: Automation Studio.** Automation Studio. URL: https://www.br-automation.com/ru/produktsiia/proghrammnoie-obiespiechieniie/automation-studio/, свободный. Загл. с экрана.

A. M. Romanov[1], Software engineer, **A. K. Petrovskaya**[2], Software engineer,
B. V. Slashchev[1], Software engineer
[1] Moscow state technical university of radiotechnics, electronics and automation,
[2] "B & R"

Usage of Modern Alternating Current Servo Drives for Direct Current Motors Control

This article reviews ways of solving a problem of absence of modern DC motor control units with output more than 300 W. This problem occurred because synchronous motors with permanent magnets are mostly better than DC motors. But despite that there are several areas, such as theaters, factories with industrial robots and machinery, made in 70s—90s, that still use DC motors for different reasons. With B & R ACOPOS inverter as an example, this article suggests a method of connecting and tuning an AC servo drives for DC motors control. It suggests a way to connect servo drive to B & R ACOPOS and contains instructions to set up ACOPOS parameter table. Suggested solution allows to obtain all advantages of modern motion control algorithms for designing and modernizing DC motor based systems. Experiment results, shown in this article, demonstrate efficiency of this method.

Keywords: *servo drive, direct current motor, inverter, control algorithm, drive tuning*

References

1. **Vol'dek A. I., Popov V. V.** Elektricheskie mashiny. Vvedenie v elektromekhaniku. Mashiny postoyannogo toka i transformatory: Uchebnik dlya vuzov. SPb.: Piter, 2007. 302 p.
2. **B&R: X20MM4456.** *X20MM4456.* URL: http://www.br-automation.com/ru/produktsiia/sistiemy-upravlieniia/sieriia-x20/upravlieniie-dvighatieliem/x20mm4456/ Zagl. s ekrana.
3. **B&R: ACOPOS.** *Intellektual'nye servoprivody.* URL: http://www.br-automation.com/ru/produktsiia/upravlieniie-dvizhieniiem/acopos/ Zagl. s ekrana.
4. **Vinogradov A. B.** Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka. Ivanovo: Izd. Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta imeni V. I. Lenina, 2008.
5. **Field** Oriented Control of 3-phase AC-Motors. Lit. No. BPRA073, Texas Instruments Europe, Feb. 1998.
6. **Lin F.-J.** Robust speed-controlled induction-motor drive using EKF and RLS estimators. *Electric Power Applications, IEE Proceedings.* 1996. V. 143. N. 3. P. 186—192.
7. **B&R: Automation Studio.** *Automation Studio.* URL: https://www.br-automation.com/ru/produktsiia/proghrammnoie-obiespiechieniie/automation-studio/ Zagl. s ekrana.

Управление и информатика в авиакосмических и морских системах

№ 12
декабрь
2014

Главный редактор:

ЛЕБЕДЕВ Г. Н.

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСЕЕВ В. В.
БАРАНОВ Л. А.
БЕЛОКОНОВ И. В.
БУКОВ В. Н.
ВАСИЛЬЕВ В. И.
ГОДУНОВ В. А.
ГУРЕВИЧ О. С.
ГУРСКИЙ Б. Г.
ЕФИМОВ В. В.
ЗАЙЦЕВ А. В.
КРЫЖАНОВСКИЙ Г. А.
НЕСТЕРОВ В. А.
ОХТИЛЕВ М. Ю.
ПАНКРАТОВ В. М.
РАСПОПОВ В. Я.
САБО Ю. И.
СТЕПАНОВ О. А.
СОЛДАТКИН В. М.
ФИЛИМОНОВ Н. Б.
ХИМЕНКО В. И.
ЧЕБУРАХИН И. Ф.
ШИРЯЕВ В. И.
ШКОЛИН В. П.

Редакция:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

СОДЕРЖАНИЕ

Афонин А. А., Тювин А. В., Сулаков А. С.
Аппаратный и алгоритмический способы уменьшения погрешностей инерциальных датчиков гравиинерциальных комплексных систем 42

Распопов В. Я.
Гиродины как объекты изучения по направлению высшего профессионального образования "Системы управления движением и навигация". Часть 1. Применение, кинематика, функционирование 52

Лобусов Е. С., Фомичев А. В.
Формирование алгоритмов бесплатформенной инерциальной системы навигации и основных режимов функционирования системы управления малогабаритного космического аппарата. Часть 1 60

© Издательство "Новые технологии", "Мехатроника, автоматизация, управление", 2014

УДК 681.2.08

А. А. Афонин, канд. техн. наук, зам. декана, доц., al_aa@mail.ru,
А. В. Тювин, канд. техн. наук, доц., ст. науч. сотр., a.tyuvin@mail.ru,
А. С. Сулаков, канд. техн. наук, зам. декана, доц., andrikman@mail.ru,
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Аппаратный и алгоритмический способы уменьшения погрешностей инерциальных датчиков гравиинерциальных комплексных систем*

Рассматриваются аппаратный и алгоритмический способы повышения точности инерциальных датчиков (акселерометров и гироскопов) корректируемой бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) в составе гравиинерциального навигационного комплекса (ГНК). Для улучшения точности датчиков предлагается периодически использовать процедуры аналитической юстировки и калибровки инерциального измерительного блока (ИИБ) БИНС на неподвижном основании перед циклом бортовых навигационно-гравиметрических измерений. Также предлагается использовать процедуру оптимальной оценки и коррекции основных погрешностей БИНС, включая погрешности ИИБ, посредством обеспечения специальных режимов движения носителя ГНК в рамках комплексирования измерений БИНС и спутниковой навигационной системы. Ожидается, что совместное использование процедур позволит обеспечить достаточную точность ИИБ для реализации бортовых векторных гравиметрических измерений. Приводятся результаты имитационного моделирования, подтверждающие возможность достижения высокой итоговой точности измерения кажущегося ускорения и абсолютной угловой скорости.

Ключевые слова: *бесплатформенная инерциальная навигационная система, инерциальный измерительный блок, аналитическая юстировка и калибровка, бесплатформенный гравиинерциальный комплекс, оптимальное оценивание, коррекция погрешностей, мера наблюдаемости, имитационное моделирование*

Введение

В настоящее время сохраняет свою актуальность проблема высокоточного определения параметров гравитационного поля Земли, в особенности в ее отдаленных и труднодоступных районах, акваториях морей и океанов, их шельфов. Традиционная аэроморская гравиметрия отличается отработанностью технологий и достаточным уровнем точности, при этом ее характеризуют низкая производительность, детальность и оперативность, высокие материальные затраты, в основном определяемые стоимостью эксплуатации среднетоннажных судов или подводных лодок, среднего класса самолетов или вертолетов с экипажем и командой исследователей [1]. В то же время, решение проблемы возможно посредством применения бортового миниатюрного бесплатформенного гравиинерционного навигационного комплекса (ГНК) малоразмерного динамичного носителя, в том числе беспилотного летательного (или подводного) аппарата [2]. При этом минимальный состав ГНК включает бесплатформенную инерциальную навигационную систему (БИНС), аппаратуру потребителя спутниковой навигационной системы (СНС), вычислительный комплекс, которые также должны отличаться относительно небольшими массогабаритными и энергопотребляющими характеристиками, невысокой стоимостью. На современном техническом уровне существуют отработанные решения для реализации второй и третьей составляющих ГНК, в то же время, построение БИНС гравиметрической точности требует применения в ее составе инерциального измерительного блока (ИИБ) с точностными характеристиками на пределе современных технических возможностей, крайне высокой стоимости, с относительно большими массой, габаритными размерами, энергопотреблением. Разрешение указанного противоречия видится в построении ГНК на базе выпускаемых промышленностью прецизионных БИНС с применением к ним аппаратных и алгоритмических способов повышения точности измерения кажущегося ускорения (КУ) и абсолютной угловой скорости (АУС).

Рациональным вариантом повышения точности БИНС является периодическая аналитическая юстировка и калибровка (АЮК) его ИИБ с использованием относительно простого оборудования перед выполнением целевой задачи [3]. В результате к началу выполнения полетного задания точность ИИБ может быть увеличена, что создает предпосылки для дополнительного повышения точности измерений путем коррекции погрешностей, оцениваемых в рамках работы функционального алгоритма ГНК с использованием оптимальной калмановской фильтрации. Особенно эффективной коррекция может быть на этапах полета, реализующих специальные режимы движения, улучшающие наблюдаемость и оцениваемость основных параметров комплекса.

Аналитическая юстировка и калибровка ИИБ

Процедура АЮК блока акселерометров (БА) без его демонтажа выступает альтернативой традиционному техническому решению по обеспечению технологическим путем номинальной ориентации осей чувствительности акселерометров в системе

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Госзадания по проекту № 813, 2014 г., руководитель Афонин А. А. и РФФИ по гранту 12-08-00028-а.

координат (СК) ИИБ, связанной с установочными базами блока на носителе ГНК.

АЮК позволяет значительно снизить технологические требования к изготовлению блока, поскольку в этом случае возможна реализация его конструкции по относительно свободным допускам с использованием общедоступного оборудования. Другим важным преимуществом рассматриваемого решения является возможность эксплуатации БА по текущему его состоянию с использованием возможности периодической его калибровки в процессе эксплуатации.

Теоретические аспекты АЮК БА заключаются в задании в СК, связанной с установочными базами блока, строгой последовательности эталонных воздействий и измерении датчиками блока соответствующих сигналов [3]. При испытаниях БА на неподвижном относительно Земли основании истинное значение вектора КУ соответствует с обратным знаком вектору ускорения силы тяжести (УСТ) в месте эксперимента: $\mathbf{n}_A = -\mathbf{g}_т$. Это позволяет рассчитать истинное значение вектора КУ в проекциях на оси СК, связанной с платформой испытательного стенда (СКП), на котором установлен БА, по соотношениям:

$$\mathbf{n}_{j\text{п}} = g_т[-\cos\alpha\sin\beta_j,\ \sin\alpha,\ \cos\alpha\cos\beta_j]^т;$$
$$\beta_j = \frac{360^\circ}{N}(j-1), \qquad (1)$$

где $j = 1, ..., N$ — номер измерения.

При этом достаточно использовать двухстепенный стенд, позволяющий первоначально выставлять раму стенда в горизонт с последующим поворотом оси рамы на угол α над горизонтом и организацией поворотов платформы с БА вокруг этой оси на заранее рассчитанные согласно (1) углы β_j, каждый из которых отвечает j-му измерению, выполняемому датчиками блока.

Значение $g_т$ определяется с достаточной степенью точностью из результатов геодезической привязки места испытаний по соотношению [4]

$$g_т(\varphi, h) = 9{,}78030\ \text{м/с}^2 + 0{,}005302\ \text{м/с}^2\sin^2\varphi -$$
$$- 0{,}000007\ \text{м/с}^2\sin^2 2\varphi - 2\omega_0^2 h,$$

где φ — геодезическая широта места испытаний; h — высота места; $\omega_0^2 = 1{,}543 \cdot 10^{-6}\ \text{с}^{-2}$ — квадрат частоты М. Шулера. Для проведения испытаний в качестве стенда достаточно использовать стандартную оптическую делительную головку, устанавливаемую на основание, выставленное в горизонт. Первое измерение выходных сигналов БА ($j = 1$) осуществляется после установки оси рамы на угол α. Последующие измерения проводятся по мере установки каждого угла β_j согласно (1). При этом для каждого датчика БА уравнение измерений выходного сигнала принимает вид

$$u_j = K_i((\mathbf{e}_\text{п} \cdot \mathbf{n}_{j\text{п}}) + \Delta U_j) + \Delta_j, \qquad (2)$$

где K_i — масштабный коэффициент i-го датчика БА ($i = 1...k$); $\mathbf{e}_\text{п} = [e_{1\text{п}}, e_{2\text{п}}, e_{3\text{п}}]^т$ — единичный вектор ориентации оси чувствительности акселерометра в СКП; Δ_j — погрешность j-го измерения; ΔU_j — погрешность датчика БА при j-м измерении, которая определяется по формуле

$$\Delta U_j = \Delta a_0 + \Delta a_1 + \Delta a_2(\mathbf{e}_\text{п} - \mathbf{n}_{j\text{п}}) + \Delta a_3(\mathbf{e}_\text{п} \cdot \mathbf{n}_{j\text{п}})^2. \qquad (3)$$

Здесь Δa_0 — вариация нулевого сигнала датчика; Δa_1 — смещение нуля; Δa_2 — коэффициент ошибки масштабного коэффициента; Δa_3 — коэффициент ошибки нелинейности выходной характеристики.

Для N измерений вида (2) составим систему линейных уравнений в отношении вектора $\mathbf{Q}$, компоненты которого представляют собой комбинацию оцениваемых параметров:

$$\mathbf{U} = \mathbf{BQ} + \mathbf{\Delta}, \qquad (4)$$

где $\mathbf{U} = [u_{i1}, ..., u_{ij}, ..., u_{iN}]^т$ — вектор из N измерений i-го датчика; $\mathbf{B}$ — матрица измерений i-го датчика; $\mathbf{\Delta} = [\Delta_{i1}, ..., \Delta_{ij}, ..., \Delta_{iN}]^т$ — вектор погрешностей измерений.

Исключение обычно малого коэффициента нелинейности выходной характеристики, а также знакопеременной вариации нулевого сигнала из вектора оцениваемых параметров и включение масштабного коэффициента вместо погрешности его определения позволяет разработать аналитическое решение задачи юстировки и калибровки акселерометров блока.

Тогда с учетом (3) уравнения (2) принимают вид

$$u_j = K_i(e_{1\text{п}}n_{1j\text{п}} + e_{2\text{п}}n_{2j\text{п}} + e_{3\text{п}}n_{3j\text{п}}) + K_i\Delta a_1 + \Delta_j. \qquad (5)$$

При повторении программы испытаний с блоком, повернутым на платформе на 180° (символ * означает принадлежность параметра случаю поворота), уравнения измерений выходного сигнала каждого датчика БА таковы:

$$u_j^* = K_i(-e_{1\text{п}}n_{1j\text{п}} - e_{2\text{п}}n_{2j\text{п}} + e_{3\text{п}}n_{3j\text{п}}) + K_i\Delta a_1 + \Delta_j^*. \qquad (6)$$

Сгруппируем (5) и (6) в соответствии с комбинациями оцениваемых параметров, принимая во внимание, что $n_{2j\text{п}} = g_т\sin\alpha$ в процессе испытаний является известной постоянной величиной:

$$u_j = K_i(\Delta a_1 + e_{2\text{п}}g_т\sin\alpha) + K_ie_{1\text{п}}n_{1j\text{п}} + K_ie_{3\text{п}}n_{3j\text{п}} + \Delta_j;$$

$$u_j^* = K_i(\Delta a_1 - e_{2\text{п}}g_т\sin\alpha) - K_ie_{1\text{п}}n_{1j\text{п}} + K_ie_{3\text{п}}n_{3j\text{п}} + \Delta_j^*.$$

Переформируем уравнения измерений для каждого датчика блока в виде суммы и разности изме-

рений для двух ориентаций БА в СКП, отличающихся поворотом на 180°:

$$U_{1j} = \frac{u_j + u_j^*}{2} = K_i \Delta a_1 + K_i e_{3\text{п}} n_{3j\text{п}} + \frac{\Delta_j + \Delta_j^*}{2} =$$

$$= q_{1,1} + q_{1,2} n_{3j\text{п}} + \frac{\Delta_j + \Delta_j^*}{2};$$

$$\mathbf{Q}_1 = [q_{1,1}, q_{1,2}]^{\text{т}};\ q_{1,1} = K_i \Delta a_1;\ q_{1,2} = K_i e_{3\text{п}},$$

где $q_{i,j}$ — компоненты вектора идентифицируемых параметров. Разности измерений соответствует система уравнений вида

$$U_{2j} = \frac{u_j - u_j^*}{2} = K_i e_{2\text{п}} g_{\text{т}} \sin\alpha + K_i e_{1\text{п}} n_{1j\text{п}} + \frac{\Delta_j - \Delta_j^*}{2} =$$

$$= q_{2,1} + q_{2,2} n_{1j\text{п}} + \frac{\Delta_j - \Delta_j^*}{2};$$

$$\mathbf{Q}_2 = [q_{2,1}, q_{2,2}]^{\text{т}};\ q_{2,1} = K_i e_{2\text{п}} g_{\text{т}} \sin\alpha;\ q_{2,2} = K_i e_{1\text{п}}.$$

Используя оценку решения системы (4) для векторов $\mathbf{Q}_1$ и $\mathbf{Q}_2$, выполняемую методом наименьших квадратов:

$$\hat{\mathbf{Q}} = (\mathbf{B}^{\text{т}}\mathbf{B})^{-1}\mathbf{B}^{\text{т}}\mathbf{U}, \tag{7}$$

для каждого акселерометра блока можно вычислить:

- масштабный коэффициент

$$K_i = \left(\frac{q_{2,1}^2}{g_{\text{т}}^2 \sin^2\alpha} + q_{2,2}^2 + q_{2,1}^2 \right)^{1/2}; \tag{8}$$

- направляющие косинусы ориентации оси чувствительности в СКП

$$\begin{cases} e_{1\text{п}} = \dfrac{q_{2,2}}{K_i}; \\ e_{2\text{п}} = \dfrac{q_{2,1}}{K_i g_{\text{т}} \sin\alpha}; \\ e_{3\text{п}} = \dfrac{q_{1,2}}{K_i}; \end{cases} \tag{9}$$

- смещение нулевого сигнала

$$\Delta a_1 = \frac{q_{1,1}}{K_i}. \tag{10}$$

Полученное решение существует, если есть решение (7) для $\mathbf{Q}_1$ и $\mathbf{Q}_2$. В отношении $\mathbf{Q}_1$ связь $\mathbf{U}$ с $\hat{\mathbf{Q}}$ обеспечивается матрицей $\mathbf{B}$ вида

$$\mathbf{B}^{\text{т}} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ g_{\text{т}}\cos\alpha\cos\beta_1 & \dots & g_{\text{т}}\cos\alpha\cos\beta_j & \dots & g_{\text{т}}\cos\alpha\cos\beta_N \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{B}^{\text{т}}\mathbf{B} = \begin{bmatrix} N & g_{\text{т}}\cos\alpha \sum\limits_{j=1}^{N} \cos\beta_j \\ g_{\text{т}}\cos\alpha \sum\limits_{j=1}^{N} \cos\beta_j & g_{\text{т}}^2\cos^2\alpha \sum\limits_{j=1}^{N} \cos^2\beta_j \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} N & 0 \\ 0 & g_{\text{т}}^2\cos^2\alpha \dfrac{N}{2} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C}^{-1} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{N} & 0 \\ 0 & \dfrac{1}{g_{\text{т}}^2\cos^2\alpha \dfrac{N}{2}} \end{bmatrix}.$$

Из (7) имеем аналитические выражения для вычисления компонент $\mathbf{Q}_1$:

$$\begin{bmatrix} q_{1,1} \\ q_{1,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{N} & 0 \\ 0 & \dfrac{1}{g_{\text{т}}^2\cos^2\alpha \dfrac{N}{2}} \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ g_{\text{т}}\cos\alpha\cos\beta_1 & \dots & g_{\text{т}}\cos\alpha\cos\beta_j & \dots & g_{\text{т}}\cos\alpha\cos\beta_N \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} \dfrac{u_1 + u_1^*}{2} \\ \dots \\ \dfrac{u_j + u_j^*}{2} \\ \dots \\ \dfrac{u_N + u_N^*}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{N} & \dots & \dfrac{1}{N} & \dots & \dfrac{1}{N} \\ \dfrac{\cos\beta_1}{g_{\text{т}}\cos\alpha \dfrac{N}{2}} & \dots & \dfrac{\cos\beta_j}{g_{\text{т}}\cos\alpha \dfrac{N}{2}} & \dots & \dfrac{\cos\beta_N}{g_{\text{т}}\cos\alpha \dfrac{N}{2}} \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} \dfrac{u_1 + u_1^*}{2} \\ \dots \\ \dfrac{u_j + u_j^*}{2} \\ \dots \\ \dfrac{u_N + u_N^*}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{2N} \sum\limits_{j=1}^{N} (u_j + u_j^*) \\ \dfrac{\sum\limits_{j=1}^{N} \cos\beta_j (u_j - u_j^*)}{g_{\text{т}}\cos\alpha N} \end{bmatrix}. \tag{11}$$

В отношении $\mathbf{Q}_2$ аналогичная связь обеспечивается матрицей $\mathbf{B}$ вида

$$\mathbf{B}^{\text{т}} =$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ -g_{\text{т}}\cos\alpha\sin\beta_1 & \dots & -g_{\text{т}}\cos\alpha\sin\beta_j & \dots & -g_{\text{т}}\cos\alpha\sin\beta_N \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{B}^{\mathrm{T}}\mathbf{B} = \begin{bmatrix} N & -g_{\mathrm{т}}\cos\alpha \sum\limits_{j=1}^{N} \cos\beta_j \\ -g_{\mathrm{т}}\cos\alpha \sum\limits_{j=1}^{N} \sin\beta_j & g_{\mathrm{т}}^2\cos^2\alpha \sum\limits_{j=1}^{N} \sin^2\beta_j \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} N & 0 \\ 0 & g_{\mathrm{т}}^2\cos^2\alpha\dfrac{N}{2} \end{bmatrix}.$$

Тогда по аналогии согласно (7) для оценки компонент $\mathbf{Q}_2$ получим

$$\left.\begin{aligned} q_{2,1} &= \frac{1}{2N}\sum_{j=1}^{N}(u_j - u_j^*); \\ q_{2,2} &= \frac{\sum\limits_{j=1}^{N}\sin\beta_j(u_j + u_j^*)}{g_{\mathrm{т}}\cos\alpha N}. \end{aligned}\right\} \qquad (12)$$

В итоге, используя решения (11) и (12), по соотношениям (8)—(10) можно вычислить требуемые параметры юстировки и калибровки БА. Аналогичным образом может быть осуществлена АЮК блока гироскопов (БГ), например, в поле вектора угловой скорости вращения Земли. Таким образом, полученные решения позволяют при использовании доступного оборудования и вычислительной техники проводить калибровку ИИБ без демонтажа блока непосредственно перед выполнением программы навигационно-гравиметрических измерений, что исключает проявление погрешности не стационарной от включения к включению.

Оценка достижимых точностных характеристик АЮК

Для оценки возможностей АЮК проведено имитационное моделирование при следующих условиях: точность установки функционально-избыточного ИИБ — не хуже 3″, БА и БГ состоят каждый из шести датчиков с полууглом раствора конуса 54,7°. Значения погрешностей (удвоенное СКО) от всех возмущающих факторов приведены в таблице.

Число измерений N	Ошибка смещения нуля		Ошибка масштабного коэффициента, %		Ошибка юстировки, "	
	БА, $10^{-5}g$	БГ, °/ч	БА	БГ	БА	БГ
12	1,20	0,0056	0,0028	0,036	7,4	36
24	0,89	0,0038	0,0020	0,025	5,4	26
36	0,34	0,0016	0,0008	0,010	2,3	10

Принималось, что вариация нулевого сигнала акселерометров не превышает $2 \cdot 10^{-5}g$, вариация нулевого сигнала гироскопов — 0,04 °/ч. Оптимальные для АЮК значения угла α составили: 40° — для БА и 39° — для БГ.

Таблица отражает предельную точность метода АЮК, представленные в ней значения практически не зависят от базовой точности используемых инерциальных датчиков.

Алгоритмический способ коррекции погрешностей ИИБ

В основе алгоритмического способа компенсации погрешностей БА и БГ ИИБ лежит использование алгоритма оценивания параметров и коррекции ГНК. Варианты структуры и состава ГНК, базовые алгоритмы его работы, основные результаты математического, имитационного и полунатурного моделирования опубликованы в работах [2, 5—8]. Отметим лишь, что минимальный состав его измерителей включает БИНС и СНС высокого класса точности, комплексная система с использованием оптимального фильтра Калмана может быть построена по разомкнутой или замкнуто-разомкнутой, слабо- или сильносвязанной схеме. Ниже приведены результаты исследований замкнуто-разомкнутой слабосвязанной схемы комплексирования, для простоты рассматривается случай с минимальным размером вектора состояния, отражающим основные свойства ГНК,

$$\mathbf{X} = (\theta_\xi, \theta_\eta, \theta_\zeta, \delta U_\xi, \delta U_\eta, \delta U_\zeta, \delta R_\xi, \delta R_\eta, \delta R_\zeta, \Delta n_{x\,\text{сист}}, \Delta n_{y\,\text{сист}}, \Delta n_{z\,\text{сист}}, \Delta\omega_{x\,\text{сист}}, \Delta\omega_{y\,\text{сист}}, \Delta\omega_{z\,\text{сист}}, \delta R_{\xi\text{Ссист}}, \delta R_{\eta\text{Ссист}}, \delta R_{\zeta\text{Ссист}}, \delta U_{\xi\text{Ссист}}, \delta U_{\eta\text{Ссист}}, \delta U_{\zeta\text{Ссист}}, \delta A_{\xi\,\text{сист}}, \delta A_{\eta\,\text{сист}}, \delta A_{\zeta\,\text{сист}})^{\mathrm{T}},$$

где $\theta_{\xi,\,\eta,\,\zeta}$ — проекции вектора малого поворота, характеризующего уход вычисленной СК относительно базовой — Земной экваториальной СК (ЭСК), на оси ЭСК (начало O — в центре Земли, ось $O\xi$ лежит на линии пересечения плоскости экватора с Гринвичским меридианом, ось $O\zeta$ направлена по вектору угловой скорости u_0 вращения Земли); $\delta U_{\xi,\,\eta,\,\zeta}$, $\delta R_{\xi,\,\eta,\,\zeta}$ — погрешности вычисления комплексом текущих проекций относительной скорости и радиус-вектора положения $\mathbf{R}$ на основании показаний корректируемой БИНС; $\delta A_{\xi,\,\eta,\,\zeta}$ — погрешности определения проекций вектора аномалии УСТ; $\Delta\omega_{x,\,y,\,z}$, $\Delta n_{x,\,y,\,z}$ — погрешности гироскопов и акселерометров в проекциях на оси, связанной с объектом СК (ССК); индексы $_{\text{сист}}$ или $_{\text{С}}$ отвечают систематическим ошибкам соответствующих параметров или параметрам, вычисляемым СНС.

Соответствующие матрицы динамики и измерения имеют вид

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} 0 & u_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_{11} & -a_{12} & -a_{13} & 000000000 \\ -u_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_{21} & -a_{22} & -a_{23} & 000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_{31} & -a_{32} & -a_{33} & \vdots\ \vdots\ 000 \\ 0 & -n_\zeta & n_\eta & 0 & 2u_0 & 0 & \omega_0^2(3l_\xi l_\xi - 1) & 3\omega_0^2 l_\xi l_\eta & 3\omega_0^2 l_\xi l_\zeta & a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 & 100 \\ n_\zeta & 0 & -n_\xi & -2u_0 & 0 & 0 & 3\omega_0^2 l_\xi l_\eta & \omega_0^2(3l_\eta l_\eta - 1) & 3\omega_0^2 l_\xi l_\eta & a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 & 010 \\ -n_\eta & n_\xi & 0 & 0 & 0 & 0 & 3\omega_0^2 l_\xi l_\zeta & 3\omega_0^2 l_\eta l_\zeta & \omega_0^2(3l_\zeta l_\zeta - 1) & a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 & 0 & 0 & 001 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 000 \\ \vdots & & & & & & \vdots & & \vdots & & & & & & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 000000000 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 0&0&0&0&0&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&-1&0&0&0&0&0&0&0&0 \\ 0&0&0&0&0&0&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&-1&0&0&0&0&0&0&0 \\ 0&0&0&0&0&0&0&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&-1&0&0&0&0&0&0 \\ 0&0&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&-1&0&0&0&0&0 \\ 0&0&0&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&-1&0&0&0&0 \\ 0&0&0&0&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&-1&0&0&0 \end{pmatrix},$$

где $a_{i,j}$ — элементы матрицы ориентации ССК относительно ЭСК; $n_{\xi,\eta,\zeta}$ и $l_{\xi,\eta,\zeta}$ — проекции КУ и орта геоцентрической вертикали $\mathbf{I}_R = \mathbf{R}(\mathbf{R}\cdot\mathbf{R})^{-1/2}$ на оси ЭСК.

Для демонстрации возможностей ГНК в повышении точности определения КУ и АУС, измеренных инерциальными датчиками ИИБ, проведено его имитационное моделирование для трех базовых случаев: 1) стоянка; 2) движение с постоянной путевой скоростью и неизменной ориентацией относительно географической СК (ГСК); 3) существенно неравномерное движение объекта с сильноменяющейся ориентацией.

Анализ наблюдаемости системы с матрицами **F** и **H**, проведенный в средах имитационного моделирования MathCAD 15.0, MATLAB R2011b и Maple 16.0, выявил, что в условиях стоянки ранг матрицы наблюдаемости второго рода нестационарной системы для непрерывного и дискретного случаев [9] равен 15, следовательно, система является не вполне наблюдаемой. В то же время, для второго и третьего случая имеем полный ранг, равный 24, и все элементы вектора состояния — наблюдаемы. Отметим, что моделирование в первых двух средах с ограниченной разрядной сеткой (15...17 значащих цифр) не всегда для второго и третьего случая позволяет получить корректный результат (особенно при небольших значениях линейных ускорений и угловых скоростей объекта), и для повышения точности вычислений надо использовать специальные приемы — нормировку, масштабирование и др. или применять среду моделирования с расширенной разрядной сеткой (возможностью выбора большего требуемого числа значащих цифр — 20...30 и более), в частности, Maple.

Итак, имитационное моделирование работы комплекса неподвижного объекта проведено при следующих условиях: $\varphi = 55{,}8115°$, $h = 168{,}7$ м; курс $\psi = 27°$, тангаж $\upsilon = 0$, крен $\gamma = 0$; время моделирования — 5400 с. Вектор аномалии УСТ задан проекциями на оси восточного, северного и вертикального направлений ГСК: $3{,}5\cdot10^{-4}$ м/с^2, $3\cdot10^{-4}$ м/с^2, $2{,}5\cdot10^{-4}$ м/с^2. Погрешности гироскопов, акселерометров и СНС заданы в виде нецентрированных белых шумов: математические ожидания и СКО ошибок гироскопов — 0,03 °/ч, акселерометров — 10^{-5} м/с^2, СНС — 1 м и 0,1 м/с по определению координат и относительной скорости (дифференциальный режим работы). Погрешности начальной выставки $\delta R_{\xi,\eta,\zeta} = 10$ м, $\delta U_{\xi,\eta,\zeta} = 0$ м/с (старт из неподвижного состояния), $\delta\psi = 10^{-3}$ рад, $\delta\upsilon = \delta\gamma = 10^{-4}$ рад.

При стоянке объекта или при его движении, близком к равномерному, с небольшой скоростью и маломеняющейся ориентацией, оценка систематических составляющих погрешностей акселерометров оказывается возможна лишь с точностью, близкой к той степени точности, с которой известны проекции аномалии УСТ вдоль траектории движения. Это связано с тем, что в первом случае $\Delta n_{x,y,z}$ наблюдаются в сложной комбинации с $\delta A_{\xi,\eta,\zeta}$ и с $\theta_{\xi,\eta,\zeta}$, и их качественное оценивание по отдельности затруднительно. Во втором случае, хоть формально все величины наблюдаемы и могут быть оценены по отдельности, но качество оценивания, характеризуемое, например, стохастическими мерами оцениваемости [10], может оказаться крайне невелико (меры малы). Поэтому для отмеченных случаев примем, что проекции аномалии заранее измерены с точностью 10^{-7} м/с^2.

Графики, демонстрирующие ошибки оценивания систематических составляющих погрешностей акселерометров и гироскопов и их стохастические меры оцениваемости, приведены на рис. 1, очевидно,

что БА и БГ в рамках ГНК могут быть откорректированы с такой точностью.

Как видно (рис. 1), систематические погрешности гироскопов, расположенных в плоскости горизонта, оцениваются с высокой степенью точности — до тысячных долей °/ч (время оценивания порядка 10 мин), вертикального — несколько хуже: до 0,01 °/ч (время оценивания — 60...90 мин). Систематическая составляющая погрешности вертикального акселерометра оценивается до уровня $3 \cdot 10^{-6}$ м/с^2 за 10 мин (отметим, что оцениваемость этого параметра можно существенно улучшить, переходя к более точному фазовому режиму работы СНС). Меры оцениваемости погрешностей гироскопов и вертикального акселерометра велики, быстро преодолевают порог в 0,1, когда оценивание признают целесообразным. В то же время, меры горизонтальных акселерометров малы, оценки их погрешностей — несостоятельны, и их оценивание нецелесо-

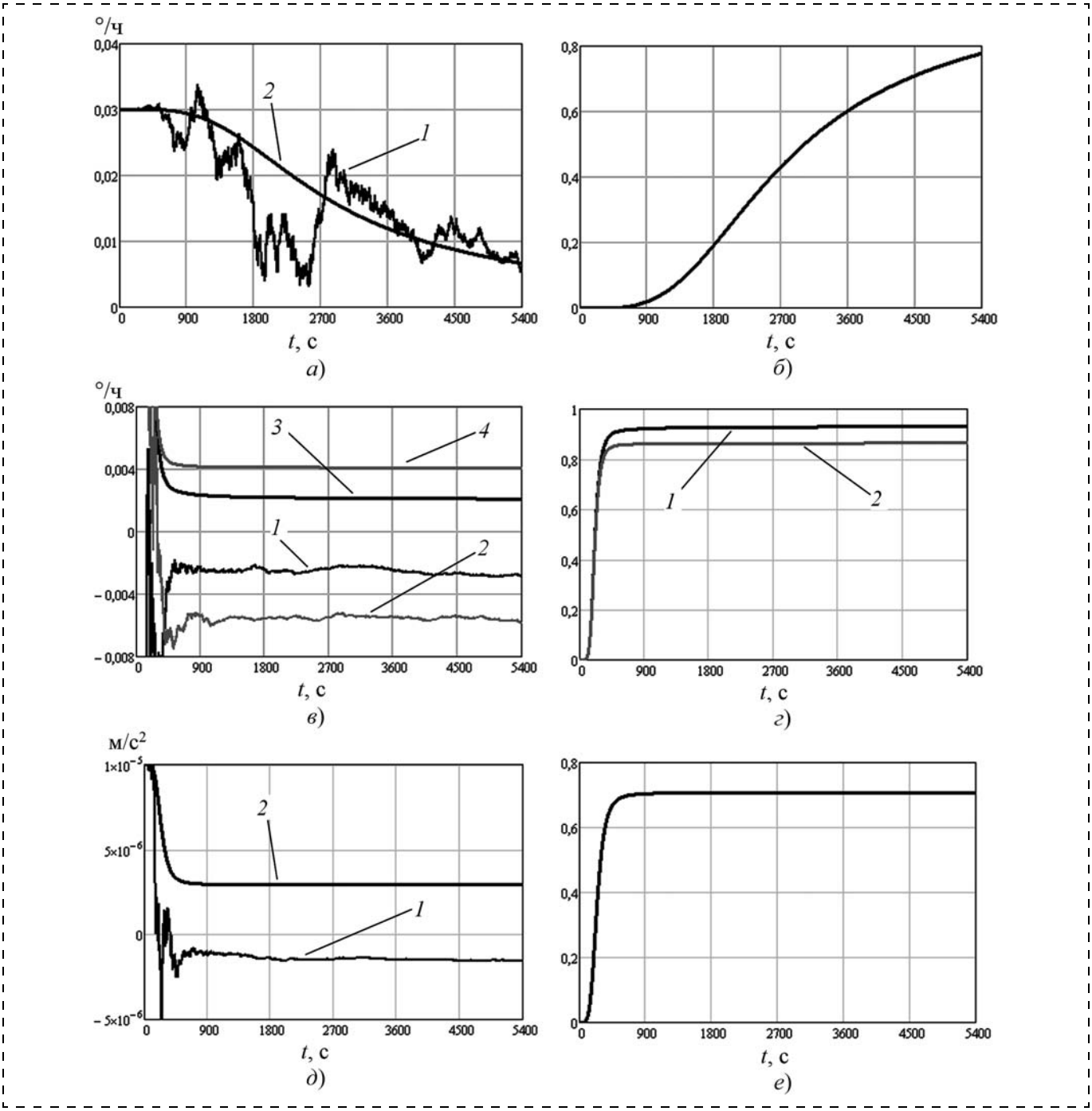

Рис. 1. Ошибки оценивания (ОО) систематических погрешностей и оценки их СКО, а также их меры оцениваемости (МО) при стоянке: *а* — ОО (*1*) и СКО (*2*) для вертикального гироскопа; *б* — МО для вертикального гироскопа; *в* — ОО (*1*) и СКО (*3*) для продольного гироскопа, ОО (*2*) и СКО (*4*) для бокового гироскопа; *г* — МО для продольного (*1*) и бокового (*2*) гироскопов; *д* — ОО (*1*) и СКО (*2*) для вертикального акселерометра; *е* — МО для вертикального акселерометра

образно в связи с остаточным влиянием на них УСТ из-за ограниченной точности оценивания $\theta_{\xi,\ \eta,\ \zeta}$.

Стоит отметить, что при стоянке (при заданных параметрах) погрешность определения северной составляющей АУС оценивается с точностью до 0,0004 °/ч (на всех широтах), в то время как погрешность определения ее восточной составляющей варьируется от 0,0004 °/ч на полюсах до 0,01 °/ч на экваторе. Курс объекта перераспределяет указанные погрешности между горизонтальными гироскопами. В районе экватора наблюдается наилучшая оцениваемость погрешности определения вертикальной составляющей АУС (до 0,004 °/ч) при полном ее отсутствии на полюсах. Точность оценки погрешности вертикального акселерометра в наибольшей степени зависит от точности определения высоты.

Имитационное моделирование работы комплекса для равномерного движения объекта с постоянной в ГСК ориентацией проведено для восточной и северной составляющих относительной скорости до 300 м/с при нулевой вертикальной. Проекции аномалии вдоль траектории заданы постоянными величинами в проекциях на оси ЭСК, соответствующими заданным выше в точке старта. Остальные параметры аналогичны случаю стоянки. Результаты моделирования не продемонстрировали резкого улучшения или ухудшения оцениваемости погрешностей инерциальных датчиков. При этом успешная оцениваемость погрешности вертикального акселерометра на практике затруднена в силу того, что заблаговременное определение аномалии УСТ вдоль протяженной траектории — очень сложная задача. При равномерном движении сохраняются отмеченные выше зависимости изменения качества оценивания погрешностей инерциальных датчиков от широты, курса и точности определения высоты. Вместе с тем, анализ результатов моделирования показал небольшое влияние постоянных горизонтальных составляющих относительной скорости

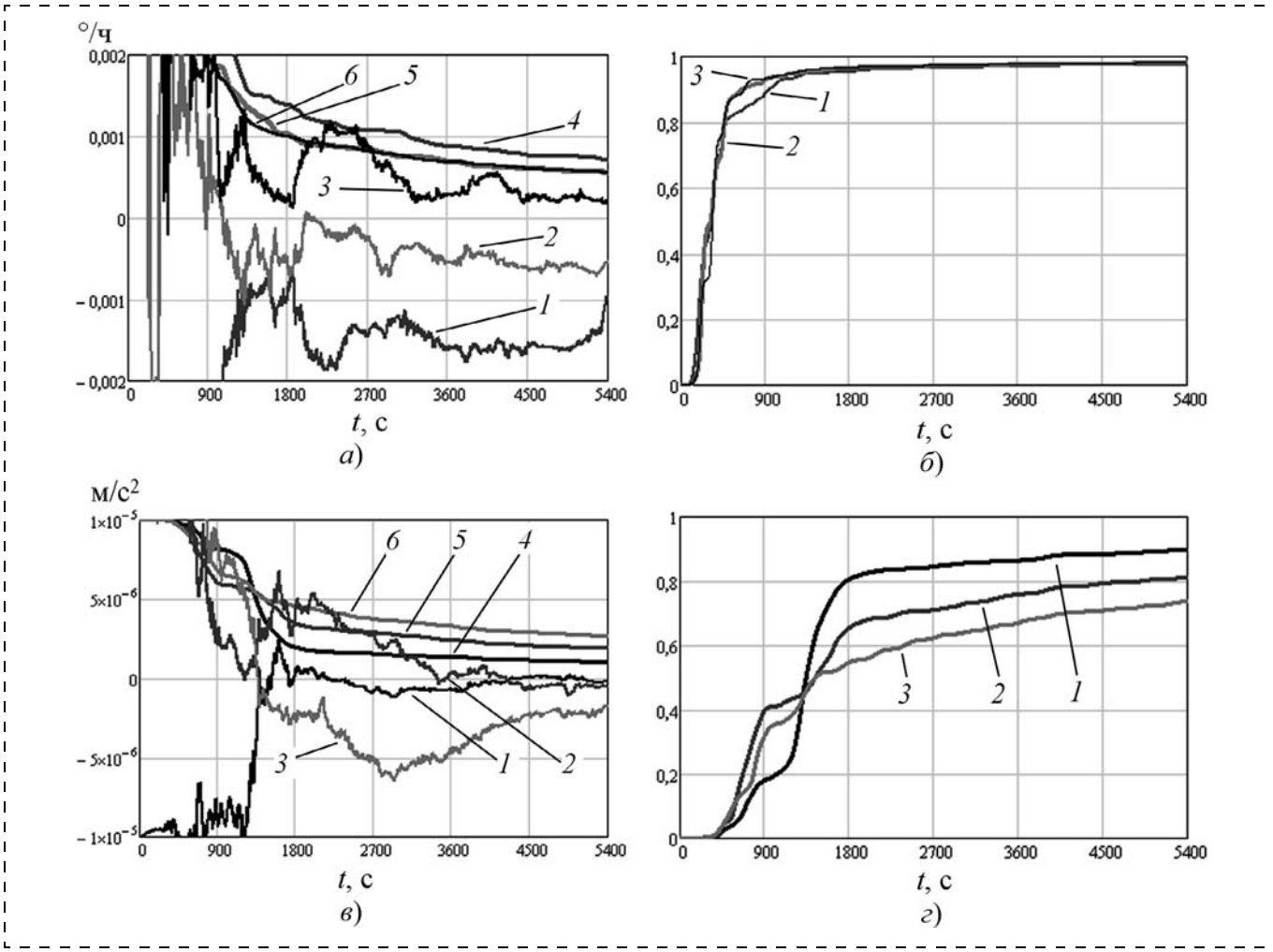

Рис. 2. Ошибки оценивания систематических погрешностей и оценки их СКО, а также их меры оцениваемости при неравномерном движении с переменной ориентацией:
а — ОО (*1*) и СКО (*4*) для продольного гироскопа, ОО (*2*) и СКО (*5*) для вертикального гироскопа, ОО (*3*) и СКО (6) для бокового гироскопа; *б* — МО для продольного (*1*), вертикального (*2*) и бокового (*3*) гироскопов; *в* — ОО (*1*) и СКО (*4*) для продольного акселерометра, ОО (*2*) и СКО (*5*) для вертикального акселерометра, ОО (*3*) и СКО (*6*) для бокового акселерометра; *г* — МО для продольного (*1*), вертикального (*2*) и бокового (*3*) акселерометров

объекта на оцениваемость погрешностей гироскопов. Установлено, что наилучшая оцениваемость погрешностей определения горизонтальных составляющих АУС наблюдается у неподвижного в инерциальной СК объекта. При этом восточная составляющая относительной скорости (способная как уменьшать, так и увеличивать проекцию АУС на ось вращения Земли) может как улучшать оцениваемость погрешности определения восточной составляющей АУС, так и ухудшать. Северная составляющая относительной скорости ухудшает оцениваемость погрешности определения северной составляющей АУС. Взаимосвязь движения с оцениваемостью погрешности определения вертикальной АУС имеет иной характер: при неподвижности в инерциальном пространстве оцениваемость этого параметра отсутствует и улучшается с ростом как восточной, так и северной (в меньшей степени) составляющей относительной скорости.

Для третьего случая моделирования выбран рациональный вариант движения объекта с точки зрения оцениваемости погрешностей ИИБ: восточная составляющая относительной скорости $U_E(t) = 300$ м/с $\sin(0{,}01\ \text{с}^{-1}\ t)$, северная $U_N(t) = 300$ м/с $\sin(0{,}03\ \text{с}^{-1}\ t)$, вертикальная $U_h(t) = 100$ м/с $\sin(0{,}03\ \text{с}^{-1}\ t)$; углы ориентации $\psi(t) = 1{,}5$ рад $\sin(0{,}01\ \text{с}^{-1}\ t)$, $\upsilon(t) = 1{,}5$ рад $\sin(0{,}003\ \text{с}^{-1}\ t)$, $\gamma(t) = 1{,}5$ рад $\sin(0{,}003\ \text{с}^{-1}\ t)$; t — время. При этом предварительная информация об аномалии УСТ вдоль траектории не потребуется, поскольку в данном случае комплекс способен в режиме реального времени оценивать как систематические погрешности акселерометров, так и определять аномалию УСТ. Остальные параметры моделирования соответствуют предыдущему случаю. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

Как видно из графиков, все меры оцениваемости велики и быстро преодолевают порог 0,1. Неравномерное движение объекта с переменной ориентацией существенно повышает оцениваемость погрешностей определения проекций АУС и КУ: систематические погрешности всех трех гироскопов оцениваются за 30...45 мин до 0,001 °/ч, акселерометров — за 30...45 мин до $2...4 \cdot 10^{-6}$ м/с^2. При этом надо отметить, что в случае использования фазового режима работы СНС погрешность оценивания систематической ошибки вертикального акселерометра может быть снижена до $0{,}5...1 \cdot 10^{-6}$ м/с^2. Можно отметить, что качество оцениваемости погрешностей инерциальных датчиков зависит от параметров движения объекта — амплитуд и частот. При этом с ростом амплитуд меры оцениваемости и точность формируемых оценок увеличиваются, в отношении круговых частот имеют место некоторые максимумы в области 0,01...0,03 с$^{-1}$ для проекций скорости и 0,003...0,01 с$^{-1}$ для углов ориентации, в их окрестности меры и точность оценок — наибольшие. Стоит отметить, что при заданном движении с высокой степенью точности оцениваются и составляющие аномалии УСТ (горизонтальные — до $1...2 \cdot 10^{-5}$ м/с^2, вертикальная — до $2 \cdot 10^{-6}$ м/с^2). Также укажем, что при заданном движении точность определения координат ограничена систематическими погрешностями СНС, проекции относительной скорости определяются с точностью до 0,002 м/с (аналогично оценивается систематическая погрешность СНС по скорости), уход базовой СК корректируется до долей угловых секунд.

Анализ мер наблюдаемости динамической системы

В целях формирования выражений для мер наблюдаемости, по аналогии с работой [11], где рассмотрен непрерывный случай, для дискретной системы рассмотрим матрицу наблюдаемости второго рода [9], которую применительно к i-му шагу работы с периодом дискретизации T можно записать в виде

$$\mathbf{M}_i = \left(\mathbf{H}\ \mathbf{H}\boldsymbol{\Phi}_i\ \mathbf{H}\prod_{j=i+1}^{i}\boldsymbol{\Phi}_j\ \ldots\ \mathbf{H}\prod_{j=i+N-2}^{i}\Phi_j \right)^{\mathrm{T}};$$

$$\mathbf{Z}_i = (\mathbf{Y}_i\ \mathbf{Y}_{i+1}\ \ldots\ \mathbf{Y}_{i+N-1})^{\mathrm{T}} = \mathbf{M}_i\mathbf{X}_i;$$

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{M}_i^{+}\mathbf{Z}_i;\ \delta\mathbf{X}_i = \mathbf{M}_i^{+}\delta\mathbf{Z}_i = \frac{\mathrm{adj}(\mathbf{M}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{M}_i)\mathbf{M}_i^{\mathrm{T}}}{\det(\mathbf{M}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{M}_i)}\delta\mathbf{Z}_i,$$

где $\boldsymbol{\Phi}_i = \mathbf{e}^{\mathbf{F}(t_i)T} = \sum_{j=0}^{+\infty}\frac{(\mathbf{F}(t_i)T)^j}{j!}$ — переходная матрица однородной системы; $\mathbf{Y}_i$ — вектор измерения; $\mathbf{M}_i^{+}$ — псевдообратная матрица на i-м шаге; N — размерность вектора состояния; δ — погрешность соответствующей величины. Тогда в качестве частной меры наблюдаемости j-го элемента $\mathbf{X}_i$ можно использовать норму j-й строки $\mathbf{M}_i^{+}$. В работе [11] используется кубическая норма, можно применять другие нормы, например, октаэдрическую, однако наиболее информативной представляется евклидова норма, поскольку она учитывает влияние всех элементов строки $\mathbf{M}_i^{+}$ (как октаэдрическая), но в наибольшей степени отражает вклад максимального по модулю элемента (как кубическая), оказывающего наибольшее влияние на рост погрешности элемента $\mathbf{X}_i$. При этом чем меньше частная норма, тем лучше наблюдаемость соответствующего элемента.

Поскольку во всех рассмотренных случаях, кроме стоянки, ранг $\mathbf{M}_i$ — полный, то в качестве обобщенной меры наблюдаемости системы в целом [11] можно рассматривать величину

$$\mu_i = \det(\mathbf{M}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{M}_i).$$

Если $\mu_i \ll 1$ говорят о слабой наблюдаемости элементов $\mathbf{X}_i$, вместе с тем, чем больше μ_i, тем лучше в целом оценивается вектор состояния.

На рис. 3 приведены частные меры наблюдаемости — значения евклидовых норм для элементов вектора состояния $\Delta n_{x,\,y,\,z\,\text{сист}}$, $\Delta\omega_{x,\,y,\,z\,\text{сист}}$ для режимов движения: 1) последний описанный выше случай неравномерного движения с переменной ориентацией; 2) случай с уменьшенными в 10 раз амплитудами проекций относительной скорости и углов ориентации; 3) случай с уменьшенными в 10 раз их круговыми частотами.

Из графиков видно, что при уменьшении амплитуд или частот изменения проекций относительной скорости и углов ориентации частные меры увеличиваются (интегрально в 10...1000 раз для разных параметров), тем самым демонстрируя сни-

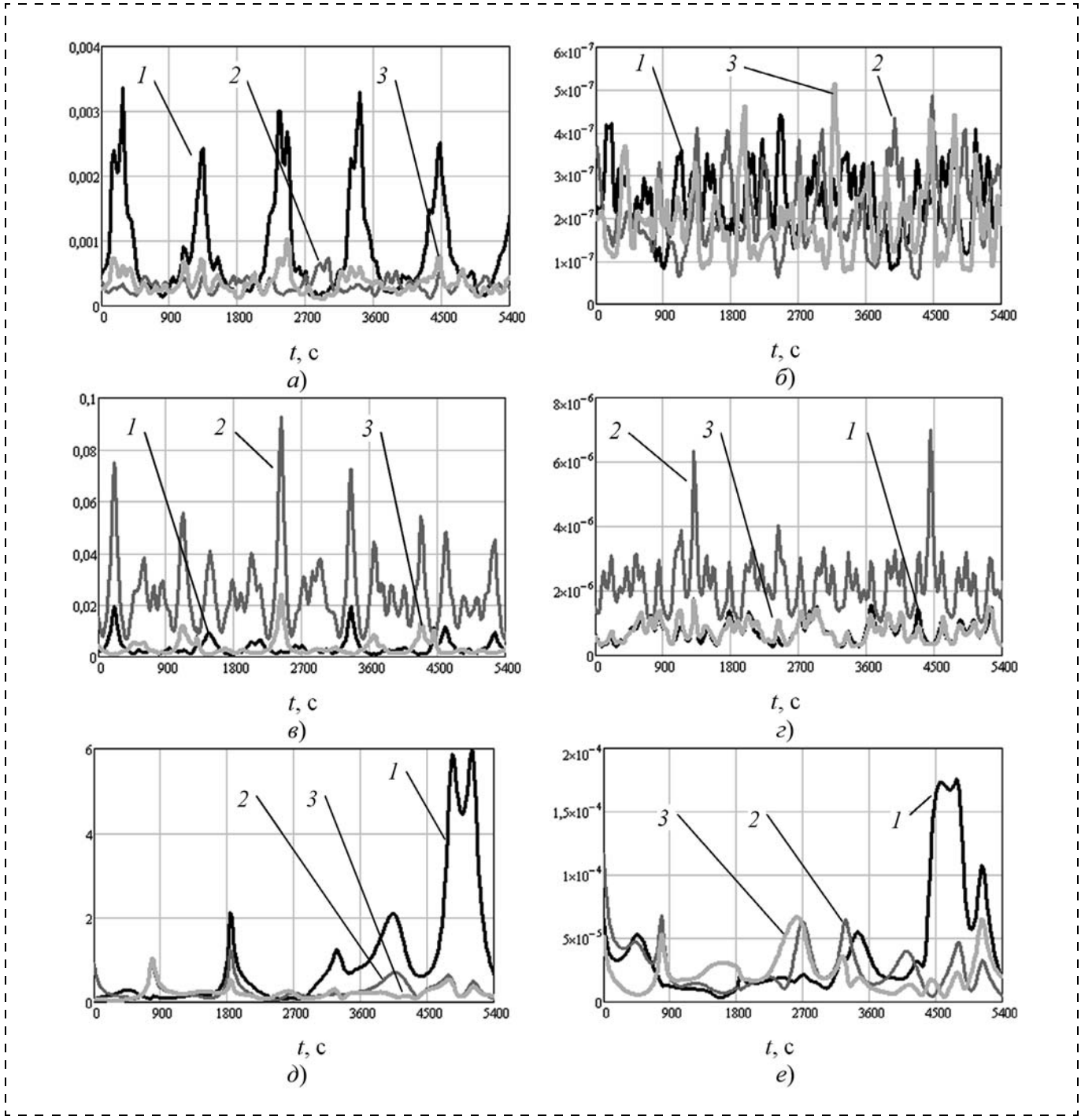

Рис. 3. Частные меры наблюдаемости для систематических погрешностей акселерометров (*а*, *в*, *д*) и гироскопов (*б*, *г*, *е*) для случаев: 1) неравномерного базового движения с переменной ориентацией (*а*, *б*); 2) с уменьшенными в 10 раз амплитудами (*в*, *г*); 3) с уменьшенными в 10 раз частотами (*д*, *е*). На рисунках: *1* — меры продольных датчиков, *2* — меры вертикальных датчиков, *3* — меры боковых датчиков

жение наблюдаемости систематических погрешностей акселерометров и гироскопов. Похожим образом ведут себя кубическая и октаэдрическая нормы. Обобщенная мера наблюдаемости при уменьшениях в 10 раз амплитуд или в 10 раз частот уменьшается в 10^{21} и в 10^{39} раз соответственно, что также демонстрирует снижение наблюдаемости вектора состояния в целом. При этом соответствующие ошибки оценивания погрешностей инерциальных датчиков увеличивались до 5 раз. Дальнейшее уменьшение амплитуд и частот приводит к еще более резкому росту частных мер и уменьшению обобщенной меры, что на теоретическом уровне подтверждает неизбежность ухудшения наблюдаемости и, соответственно, оцениваемости погрешностей инерциальных датчиков, особенно при небыстром равномерном движении с неизменной ориентацией и при стоянке.

Заключение

Итак, предложенная процедура аналитической юстировки и калибровки с использованием доступного стандартного оборудования позволит осуществлять периодическую проверку состояния инерциальных измерительных блоков БИНС для поддержания их точностных характеристик на достаточно высоком уровне для использования в прецизионных бортовых гравиинерциальных измерениях. Дополнительное повышение точности измерения кажущегося ускорения и абсолютной угловой скорости возможно посредством реализации оригинального алгоритма оценивания погрешностей и коррекции комплексной системы с использованием оптимальной калмановской фильтрации. Установлено, что особенно эффективной коррекция может быть на этапах полета, реализующих режимы существенно неравномерного движения с переменной ориентацией, улучшающего наблюдаемость и оцениваемость элементов вектора состояния системы.

Список литературы

1. **Применение** гравиинерциальных технологий в геофизике // Сборник статей и докладов под общей редакцией В. Г. Пешехонова. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2002. 199 с.
2. **Афонин А. А., Сулаков А. С., Ямашев Г. Г., Михайлин Д. А., Мирзоян Л. А., Курмаков Д. В.** О возможности построения бесплатформенного управляющего навигационно-гравиметрического комплекса беспилотного летательного аппарата // Труды МАИ. 2013. № 66.
3. **Тювин А. В.** Аналитическая юстировка и калибровка инерциального измерительного блока бесплатформенной инерциальной навигационной системы // Труды МАИ. 2013. № 71.
4. **Миронов В. С.** Курс гравиразведки. Л.: Недра, Ленинградское отделение, 1980.
5. **Афонин А. А., Сулаков А. С.** Полный замкнуто-разомкнутый алгоритм функционирования бесплатформенного гравиинерциального комплекса // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 4.
6. **Афонин А. А., Репников А. В., Сулаков А. С., Ямашев Г. Г.** Анализ результатов моделирования работы бесплатформенного гравиинерциального навигационного комплекса // Труды МАИ. 2011. № 49.
7. **Афонин А. А., Сулаков А. С.** Алгоритм оценивания параметров гравитационного поля, ориентации и навигации бесплатформенного гравиинерциального комплекса // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 9.
8. **Афонин А. А., Сулаков А. С.** О коррекции параметров ориентации, навигации и гравиметрии в замкнутой схеме включения фильтра Калмана навигационного комплекса // Авиакосмическое приборостроение. 2011. № 8.
9. **Браммер К., Зиффлинг Г.** Фильтр Калмана—Бьюси. Пер. с нем. М.: Наука. Главная редакция физ.-мат. литературы, 1982.
10. **Парусников Н. А., Голован А. А., Вараввa В. Г.** О стохастической мере оцениваемости // Коррекция в навигационных системах и системах ориентации искусственных спутников Земли / Под. ред. В. М. Морозова и Н. А. Парусникова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986.
11. **Багмут И. А.** К вопросу о мере наблюдаемости // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ": Системний аналіз, управління та інформаційні технології. 2009. № 10.

A. A. Afonin, Associate professor, al_aa@mail.ru, **A. V. Tyuvin,** Senior researcher, a.tyuvin@mail.ru,
A. S. Sulakov, Associate professor, andrikman@mail.ru,
Moscow Aviation Institute (National Research University)

Hardware and Algorithmic Methods of Reducing Errors of Graviinertial Complex Systems Inertial Sensors

The paper deals with the hardware and algorithmic methods of increasing the accuracy of inertial sensors (accelerometers and gyroscopes) of a corrected strapdown inertial navigation system, which is the main block of the graviinertional navigation system. To improve the accuracy of sensors it is offered to periodically use the analytical adjustment and calibration of inertial measurement unit of strapdown inertial navigation system on stationary base before the onboard navigation and gravimetric measurements. It is also proposed to use optimal estimation and correction procedures of main strapdown inertial navigation system errors, including inertial measurement unit errors by providing the special modes of system carrier movement. It is expected that the joint use of procedures will allow to provide the inertial measurement unit sufficient accuracy for the implementation of the onboard vector gravimetric measurements. The results of the simulation, confirming the possibility of achieving of high total accuracy of measurements of proper acceleration and absolute angular velocity are given.

Keywords: *strapdown inertial navigation system, inertial measurement unit, analytical adjustment and calibration, strapdown graviinertial system, optimal estimation, errors correction, observability measure, simulation*

References

1. **Primenenie** graviinertsial'nykh tekhnologiy v geofizike. *Sbornik statey i dokladov pod obshchey redaktsiey V. G. Peshekhonova*. SPb.: GNTs RF TsNII "Elektropribor", 2002. 199 p.
2. **Afonin A. A., Sulakov A. S., Yamashev G. G., Mikhaylin D. A., Mirzoyan L. A., Kurmakov D. V.** O vozmozhnosti postroeniya besplatformennogo upravlyayushchego navigatsionno-gravimetricheskogo kompleksa bespilotnogo letatel'nogo apparata. *Trudy MAI*. 2013. № 66.
3. **Tyuvin A. V.** Analiticheskaya yustirovka i kalibrovka inertsial'nogo izmeriternogo bloka besplatformennoy inertsial'noy navigatsionnoy sistemy. *Trudy MAI*. 2013. № 71.
4. **Mironov V. S.** Kurs gravirazvedki. L.: Nedra, Leningradskoe otdelenie, 1980.
5. **Afonin A. A., Sulakov A. S.** Polnyy zamknuto-razomknutyy algoritm funktsionirovaniya besplatformennogo graviinertsial'nogo kompleksa. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2013. № 4.
6. **Afonin A. A., Repnikov A. V., Sulakov A. S., Yamashev G. G.** Analiz rezul'tatov modelirovaniya raboty besplatformennogo graviinertsial'nogo navigatsionnogo kompleksa. *Trudy MAI*. 2011. № 49.
7. **Afonin A. A., Sulakov A. S.** Algoritm otsenivaniya parametrov gravitatsionnogo polya, orientatsii i navigatsii besplatformennogo graviinertsial'nogo kompleksa. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2011. № 9.
8. **Afonin A. A., Sulakov A. S.** O korrektsii parametrov orientatsii, navigatsii i gravimetrii v zamknutoy skheme vklyucheniya fil'tra Kalmana navigatsionnogo kompleksa. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*. 2011. № 8.
9. **Brammer K., Ziffling G.** Fil'tr Kalmana—B'yusi. Per. s nem. M.: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiz.-mat. literatury, 1982.
10. **Parusnikov N. A., Golovan A. A., Varavva V. G.** O stokhasticheskoy mere otsenivaemosti. *Korrektsiya v navigatsionnykh sistemakh i sistemakh orientatsii iskusstvennykh sputnikov Zemli* / Pod. red. V. M. Morozova i N. A. Parusnikova. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1986.
11. **Bagmut I. A.** K voprosu o mere nablyudaemosti. Sbornik nauchnykh trudov *"Vestnik NTU "KhPI": Sistemniy analiz, upravlinnya ta informatsiyni tekhnologiї*. 2009. № 10.

УДК 621.396.988.6:629.19

В. Я. Распопов, д-р техн. наук, зав. кафедрой, tgupu@yandex.ru,
Тульский государственный университет

Гиродины как объекты изучения по направлению высшего профессионального образования "Системы управления движением и навигация" Часть 1. Применение, кинематика, функционирование

Рассмотрены основные особенности силовых гироскопических комплексов систем стабилизации и управления космических аппаратов как объектов изучения по направлению "Системы управления движением и навигация". Приведены основные определения, терминология и примеры применения гиродинов. Описаны основные режимы работы и основные кинематические схемы гиродинов.

Ключевые слова: *гиродин, гироскоп, гиростабилизатор, космический аппарат, демпфирование, управление, стабилизация, режим работы*

Введение

В современной отечественной учебной литературе по направлению высшего профессионального образования "Системы управления движением и навигация" отсутствует материал по гиродинам как гироскопическим силовым управляющим комплексам, относящимся к классу непосредственных гиростабилизаторов, обеспечивающих решение задач космических информационных технологий.

Гиродины представляют несомненный интерес для изучения по следующим основным причинам:

- расширяется представление об областях применения непосредственных гиростабилизаторов, что немаловажно для мотивации изучения технологий гироскопической стабилизации;
- гиродины — уникальные технические системы, позволяющие реализовать безынерционное, высокоточное управление угловым положением космического аппарата (КА) без применения расходных материалов;
- комплекс "КА — гиродины" требует при изучении системного подхода из-за явно выраженного силового взаимодействия между КА и гиродином.

Определения и терминология

Силовые гироскопические управляющие комплексы (ГУК), называемые также силовыми гироскопическими комплексами (СГК), или гиродинами, в составе КА решают задачи их стабилизации и управления угловым положением, обеспечивая решение задач космических информационных технологий [1, 2].

Гиродины могут быть укрупненно классифицированы в зависимости от числа осей стабилизации (или управления) и применяемых исполнительных устройств (рис. 1).

Наиболее простыми гиродинами являются двигатели-маховики для стабилизации скорости вращения КА, принцип работы которых базируется на законе сохранения момента количества движения [3].

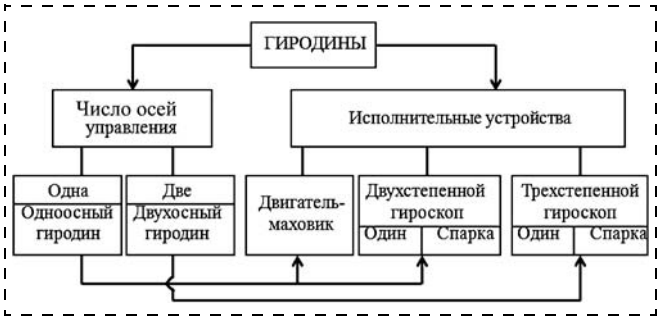

Рис. 1. Основные классификационные признаки гиродинов

Теория двух- и трехстепенных гироскопов, применяемых в СГК в качестве исполнительных устройств, достаточно и полно изложена в многочисленных монографиях и учебных пособиях, например в работах [3—6]. В СГК используются как стабилизирующее, так и прецессионное свойства гироскопов.

В космической промышленности США двухосные СГК называют гироскопами с управляющим моментом (CMG, control moment gyroscope).

В работе [2] отмечается, что первые публикации в открытой печати, посвященные применению гироскопической стабилизации для управления угловым положением спутников, в англоязычной литературе датированы 1957—1959 гг. Примерно в это же время начались отечественные разработки в этом направлении, которые активно развиваются в наше время [7—12]. Между тем в известном обзоре [13] отсутствует даже упоминание о гиродинах.

Объекты изучения. Применение и технические характеристики СКГ

Одна из первых орбитальных космических станций (ОКС), на которой отрабатывались новые космические технологии, в том числе применение CMG, была станция "Скайлэб" (США). Она была выведена на орбиту 14.05.1973 г. и прекратила существование 9.07.1979 г. На станции работали три экспедиции астронавтов. В системе ориентации ОКС (погрешность до трех угловых минут) использовали инерциальный измеритель линии горизонта, в качестве исполнительных органов — три CMG (гиродины), а для гашения кинетических моментов CMG (режим разгрузки) применяли микродвигатели с тягой 680 Н, работавшие на сжатом азоте.

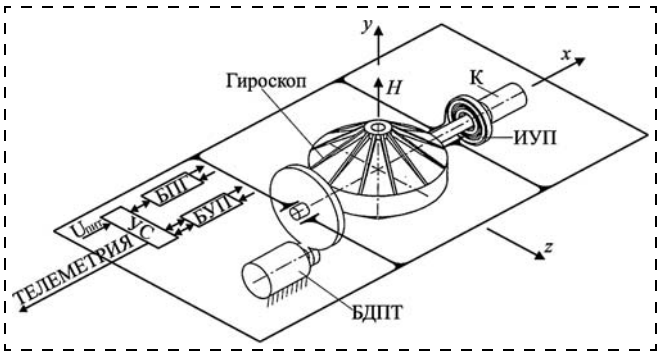

Рис. 2. Функциональная схема одноосного гироскопического управляющего комплекса

Уникальной по многим техническим решениям (бесплатформенная инерциальная навигационная система; звездные датчики; многомашинный вычислительный комплекс; СГК с тремя гиродинами, масса каждого из которых 300 кг, а частота вращения ротора около 9000 мин$^{-1}$) и беспрецедентной длительности полета была ОКС "МИР", которая работала с 15.03.1986 г. по 26.09.2001 г.

Одноосные СГК (ГУК, гиродины) в настоящее время являются основными исполнительными органами систем ориентации малых КА с длительным сроком активного существования. На рис. 2 приведена функциональная схема одноосного СГК, в состав которого входит двухстепенной гироскоп, блок питания гироскопа (БПГ) и блок управления приводом (БУП) [2, 8]. Питание ($U_{пит}$) и обмен информацией между блоками происходит через устройство сопряжения (УС) — интерфейс. Точность управляющего момента гиродина обеспечивается исполнительным электроприводом, в состав которого входят измеритель углового положения (ИУП) подвеса гироскопа, бесконтактный двигатель постоянного тока (БДПТ) с одноступенчатым редуктором и БУП.

Погрешность отработки заданной угловой скорости вращения подвеса гироскопа в диапазоне от 0,1 до 60 °/с — не более 1%.

В качестве примера в таблице приведены основные технические характеристики гиродинов, выполненных по схеме рис. 2 (ФГУП "НИИ КП", С.-Петербург).

Основные технические характеристики гиродинов (СГК)

Характеристика	СГК-100	СГК-30	СГК-3
Кинетический момент, Н · м · с^2	(60;100)	30	3
Максимальный управляющий момент, Н · м	100	30	1
Диапазон изменения скорости поворота подвеса, °/с	±57,3	±57,3	±21
Дискретность изменения скорости поворота подвеса, °/с	0,007	0,007	0,03
Масса с блоком электроники, кг	25,6	16,5	4,5

Двухосный ГУК применен, например, в КА землеобзора "Ресурс — ДК1" [8].

Кинематическая схема ГУК КА "Ресурс — ДК1" приведена на рис. 3. ГУК включает два трехстепенных гироскопа ($Г_1$, $Г_2$) с равными кинетическими моментами гиромоторов ($H_1 = H_2$), векторы которых направлены в разные стороны. Одноименные оси подвеса гироскопов кинематически связаны гибкими лентами (блоки синхронизации — БС), обеспечивающими развороты гироскопов относительно одноименных осей подвеса на одинаковые углы, но в разные стороны. Принудительный раз-

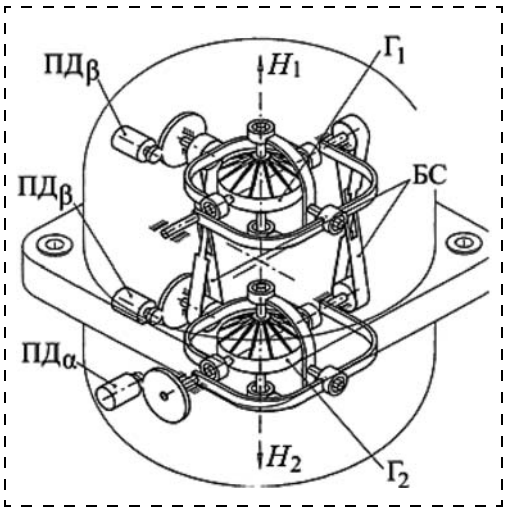

Рис. 3. Кинематическая схема двухосного гироскопического управляющего комплекса

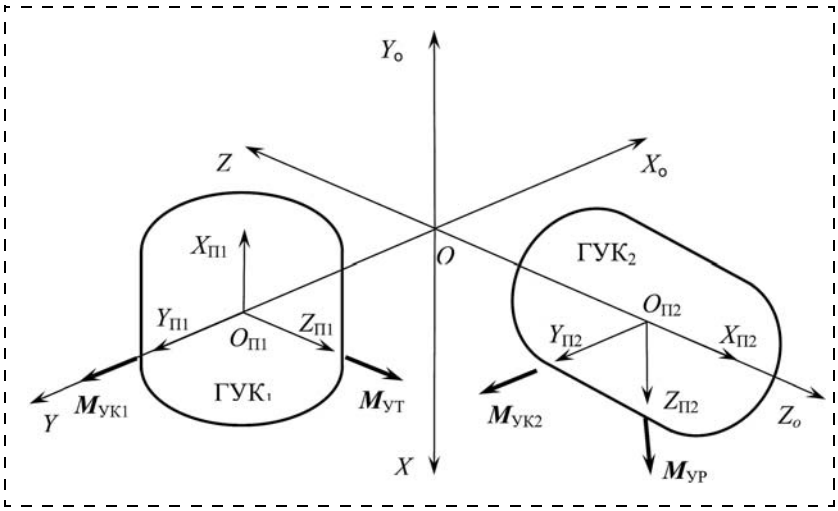

Рис. 4. Схема расположения ГУК на борту КА

ворот (прецессия) гироскопов относительно осей подвеса выполняется с помощью двигателей, которые называют прецессионными ($ПД_\alpha$, $ПД_\beta$).

Технические характеристики гиродина комплекса "Ресурс — ДК1" приведены ниже.

Технические характеристики гиродина комплекса "Ресурс — ДК1"

Максимальный управляющий момент, Н · м	14,8
Кинетический момент ротора, Н · м · с^2	94 ± 2,4
Диапазон скоростей вращения подвеса гироскопа, °/с	±8,6
Дискретность скорости вращения подвеса гироскопа, °/с	0,0337
Точность выдачи информации об угловом положении подвеса гироскопа, не хуже, ′	15
Потребляемая мощность на одной оси стабилизации, не более, Вт	45
Масса, не более, кг	48

Двухосные ГУК осуществляют управление КА по двум угловым координатам (α, β), например по крену и тангажу, создавая управляющие гироскопические моменты с помощью принудительного вращения гироскопов прецессионными двигателями ($ПД_\alpha$, $ПД_\beta$).

СГК (ГУК, гиродин) типа "Квадрат — С" является управляющим органом системы управления КА "Янтарь" и создает управляющие моменты по трем угловым координатам (крен, тангаж, рыскание). Для управления угловыми движениями КА используются два ГУК, схема расположения которых на борту КА приведена на рис. 4.

На рис. 4 изображены связанная система координат КА *OXYZ*, подвижная орбитальная система координат $O_oX_oY_oZ_o$ и приборные системы координат $O_{п1}X_{п1}Y_{п1}Z_{п1}$ первого ГУК и $O_{п2}X_{п2}Y_{п2}Z_{п2}$ второго ГУК.

$ГУК_1$ создает управляющие гироскопические моменты по каналам крена $M_{УК1}$ и тангажа $M_{УТ}$.

$ГУК_2$ создает управляющие гироскопические моменты по каналам крена $M_{УК2}$ и рыскания $M_{УР}$.

При таком расположении ГУК управление по каналу крена, в котором требуются максимальные угловые скорости программных поворотов, осуществляется двумя ГУК совместно, а в каналах тангажа и рыскания используется только по одному ГУК.

Технические характеристики ГУК приведены ниже.

Технические характеристики ГУК

Максимальное значение создаваемого кинетического момента:	
— по оси крена, Н · м · с^2	340 ± 18
— по осям тангажа и рыскания, Н · м · с^2	170 ± 9
Диапазон углов поворота наружных рамок, °	±65
Время готовности, мин	не более 240
Масса, кг	не более 218,6

Кинематика и функционирование

Одноосные управляющие комплексы на двухстепенных гироскопах

Принципиальная схема системы "КА — управляющий комплекс" приведена на рис. 5.

С КА связана система координат *XYZ*, положение которой относительно опорной СК ξηζ определено углом ϑ. Управляющий комплекс (УК) представляет собой двухстепенной гироскоп (Г), который состоит из ротора и рамы. Ось подвеса (ось прецессии) гироскопа связана с КА через подшипниковые узлы, в которых она установлена. С гироскопом связана СК $x_г y_г z_г$, положение которой относительно связанной СК *XYZ* определено углом β. Вектор *H* кинетического момента ротора направлен по оси $0y_г$ его вращения.

При таком расположении УК управляемым параметром углового движения КА является угол тангажа ϑ (ось *OZ* является осью стабилизации). Поведение механической системы "КА — УК" аналогично поведению трехстепенного астатического гироскопа, в котором роль наружной (внешней) рамы выполняет корпус КА [4, 14].

При знакопостоянном возмущающем моменте $M_{вζ}$ значение угла β в ходе прецессионного движе-

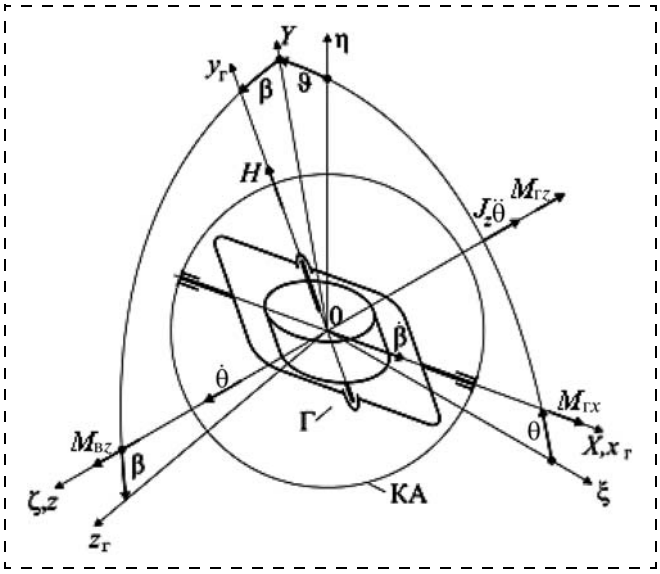

Рис. 5. Принципиальная схема системы "КА—УК" для пассивного режима работы (КА — космический аппарат, Г — гироскоп (УК))

ния гироскопа постоянно возрастает, что приводит к снижению эффективности гироскопической стабилизации. При достижении значения угла $\beta = \pm 90°$ векторы $M_{вz}$ и H будут совпадать по направлению, гироскопический момент $M_{гx} = 0$, а для компенсации сколь угодно малого возмущающего момента потребуется прецессионное движение с угловой скоростью $\dot{\beta} = \infty$. В таком состоянии УК полностью теряет стабилизирующее свойство. Это явление называется насыщением силового гироскопа. Для вывода УК из состояния насыщения предусматривается специальный режим работы УК — режим "разгрузки", заключающийся в принудительном развороте рамки гироскопа в исходное положение, соответствующее условию $\beta = 0°$.

Пассивный режим работы УК используется только для угловой стабилизации КА.

Принципиальная схема однороторного УК на двухстепенном гироскопе для активного режима изображена на рис. 6. Для реализации активного режима УК включается в контур системы управления угловым движением КА через исполнительное устройство в виде прецессионного двигателя (ПД). Вал ПД жестко связан с осью подвеса рамы гироскопа.

При появлении на входе ПД управляющего сигнала $U_у$ формируется момент $M_{ПД}$, приложенный к оси вращения рамы гироскопа. Под действием этого момента рама гироскопа будет поворачиваться с угловой скоростью $\dot{\beta}$, вследствие чего, аналогично пассивному режиму, возникнет гироскопический момент $M_{гz} = (H\cos\beta)\dot{\beta} = H\dot{\beta}$, который через подшипниковые узлы подвеса рамы гироскопа воздействует на корпус КА.

Именно этот момент играет роль управляющего гироскопического момента в активном режиме работы УК, под действием которого КА разворачивается вокруг оси стабилизации OZ с угловым ускорением

$$\ddot{\vartheta} = M_{гz}/J_z.$$

В процессе движения гироскоп вместе с корпусом КА будет вращаться вокруг оси OZ с угловой скоростью $\dot{\vartheta}$, что приведет к возникновению второго гироскопического момента $M_{гx} = (H\cos\beta)\dot{\vartheta} = H\dot{\vartheta}$. В момент достижения угловой скорости значения $\dot{\vartheta} = M_{ПД}/H\cos\beta$ достигается равенство $M_{ПД} = M_{гx}$, и переходный процесс в системе "КА — УК" завершится.

В момент достижения требуемого углового положения КА по углу ϑ управляющий сигнал снимается и процесс управления оканчивается.

Влияние реактивных моментов, действующих на КА во время раскрутки (разгона) роторов гироскопа, а также частичное устранение влияния на КА перекрестных связей между каналами управления реализуются в двухгироскопном управляющем комплексе, принципиальная схема которого приведена на рис. 7 [3].

УК содержит два гироскопа ($Г_1$ и $Г_2$), рамы подвеса которых кинематически связаны таким образом, что обеспечена возможность их вращения только в противоположные стороны. Реализовать такую кинематическую связь можно с помощью шестеренок или секторов с зубчатым или фрикционным зацеплением, а также с помощью перекрестных ленточных передач.

Кинематически связанные подобным образом гироскопы часто называют спарками гироскопов, или просто спарками.

Кинетические моменты гироскопов равны по значению и противоположно направлены, т. е. $H_1 = -H_2$. То же относится к угловым скоростям прецессии: $\dot{\beta}_1 = -\dot{\beta}_2$. Принцип действия двухгироскопного и одногироскопного УК идентичны.

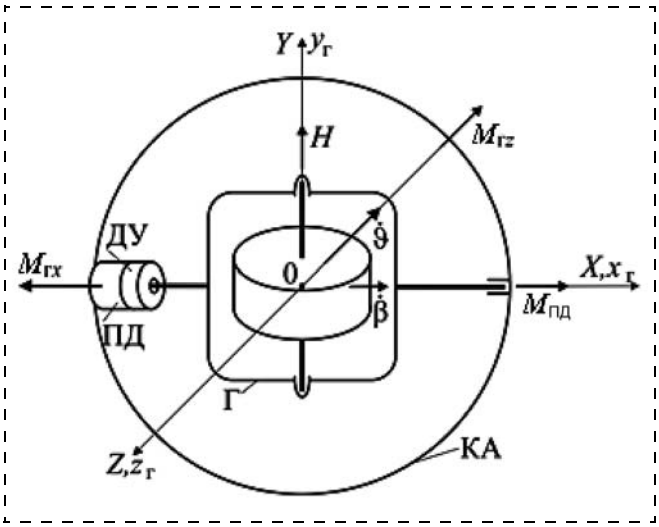

Рис. 6. Принципиальная схема системы "КА—УК" для активного режима работы (ПД — прецессионный двигатель, Г — гироскоп, ДУ — датчик угла)

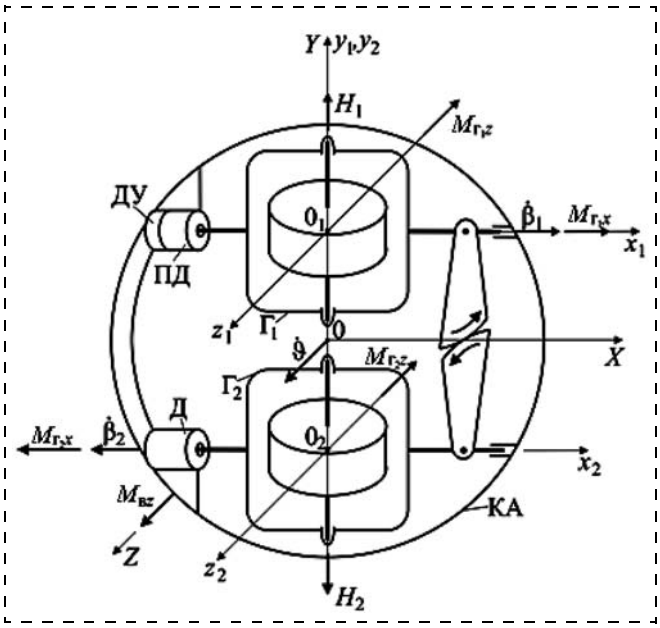

Рис. 7. Принципиальная схема системы "КА — двухгироскопный управляющий комплекс" (КА — космический аппарат; Γ_1, Γ_2 — гироскопы, ПД — прецессионный двигатель, ДУ — датчик углов, Д — демпфер)

В пассивном режиме внешний возмущающий момент $M_{вz}$ вызывает угловое движение корпуса КА и обоих гироскопов вокруг оси OZ с угловой скоростью $\dot\vartheta$, в результате чего возникают гироскопические моменты $M_{\Gamma_1 x} = H_1\dot\vartheta$, $M_{\Gamma_2 x} = H_2\dot\vartheta$, равные по значению и направленные в противоположные стороны.

В результате прецессионного движения гироскопов с равными по значению и противоположными по знаку угловыми скоростями $\dot\beta_1$ и $\dot\beta_2$ возникнут равные по значению и направленные в одну сторону гироскопические моменты $M_{\Gamma_1 z}$ и $M_{\Gamma_2 z}$, которые определяются выражениями

$$M_{\Gamma_1 z} = H_1\dot\beta_1\cos\beta_1,\ M_{\Gamma_2 z} = H_2\dot\beta_2\cos\beta_2.$$

В результате к корпусу КА будет приложен удвоенный компенсирующий момент, который при условиях $H_1 = H_2 = H$; $\dot\beta_1 = \dot\beta_2 = \dot\beta$; $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ определяется равенством $M_{\Gamma z} = 2H\dot\beta\cos\beta$.

В активном режиме спарка обеспечивает двойное усиление момента прецессионного двигателя, приложенного к раме гироскопа.

В силу того, что в спарке роторы гироскопов вращаются в противоположные стороны, приложенные к корпусу КА реактивные моменты во время разгона гироскопов, а также моменты перекрестных связей будут компенсировать влияние друг друга. В этом состоит основное преимущество спаренных силовых гироскопов перед одногироскопными.

Двухосные управляющие комплексы на трехстепенных гироскопах в режиме пассивной стабилизации

Двухгироскопный УК на трехстепенных гироскопах [1, 8, 15], упрощенная кинематическая схема которого приведена на рис. 8, содержит два гироузла Γ_1 и Γ_2, установленных в кардановых подвесах. Гироузел состоит из ротора и статора гиромотора, смонтированных в кожухе, на котором закреплены четыре полуоси. Векторы кинетических моментов H_1 и H_2 гироузлов направлены в противоположные стороны.

Карданов подвес каждого гироузла состоит из трех полурам (лир) *1*, *2* и *3*, которые вместе с кожухом гироузла обеспечивают ротору три степени свободы вращательного движения относительно корпуса прибора. Можно считать, что ось вращения лиры *2*, установленной на разнесенных опорах, является осью наружной рамки, а ось вращения лиры *3* передает гироузлу вращение лиры *2*. Полуоси кожуха гироузла установлены в шарикоподшипниковых опорах лир *1* и *3*, которые называют также полурамами.

Лиры *1* и *2* кардановых подвесов гироузлов Γ_1 и Γ_2 попарно соединены спарниками C_β и C_α соответственно.

Для создания управляющих моментов в активном режиме используются прецессионные двигатели (приводы) $ПД_\beta$ и $ПД_\alpha$, связанные с лирами *1* и *2* соответственно. Если по оси подвеса полурам *1* или *2* одного из гироскопов прикладывается управляющий момент, то на другой гироузел он передается через спарник с противоположным знаком.

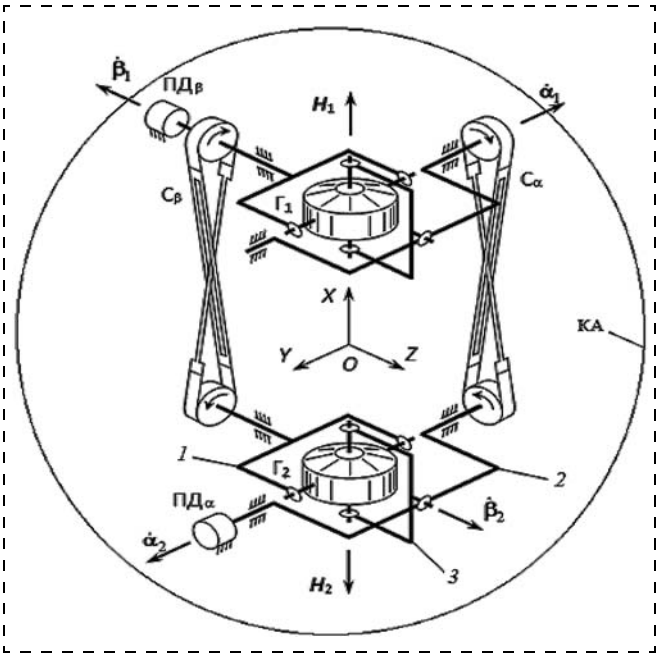

Рис. 8. Кинематическая схема двухгироскопного УК на трехстепенных гироскопах (Γ_1, Γ_2 — гироузлы; ПД — прецессионные двигатели; *1*, *2*, *3* — элементы (полурамы) подвеса)

Управляющие моменты формируются по осям OY и OZ. Рассмотрим работу УК, следуя работам [1, 3, 8, 15].

В режиме пассивной стабилизации на приводы $ПД_\beta$ и $ПД_\alpha$ управляющие сигналы не подаются. Допустим, что к КА по оси OZ приложен постоянный возмущающий момент $M_{вz}$ (рис. 9). Этот момент вызывает вращение КА с угловым ускорением $\ddot{\vartheta}$. При этом угловая скорость $\dot{\vartheta}$ разворота начинает возрастать.

С появлением угловой скорости $\dot{\vartheta}$ возникают гироскопические моменты $M_{\Gamma_1 y}$ и $M_{\Gamma_2 y}$ относительно осей, параллельных оси OY, которые определяются выражениями $M_{\Gamma_1 y} = H_1 \dot{\vartheta} \cos\alpha_1$, $M_{\Gamma_2 y} = -H_2 \dot{\vartheta} \cos\alpha_2$.

Гироскопы имеют равные по величине собственные кинетические моменты ($H_1 = H_2$), а спарник C_α обеспечивает равенство углов $\alpha_1 = \alpha_2$.

Противоположно направленные моменты $M_{\Gamma_1 y}$ и $M_{\Gamma_2 y}$ через лиры *3* передаются на лиры *2* и вызывают их вращение со скоростями $\dot{\alpha}_1$ и $\dot{\alpha}_2$ в сторону совмещения векторов H_1 и H_2 с вектором возмущающего момента $M_{вz}$. Спарник C_α такому движению не препятствует.

Прецессия гироскопов с угловыми скоростями $\dot{\alpha}_1$ и $\dot{\alpha}_2$ приводит к возникновению гироскопических моментов $M_{\Gamma_1 \alpha} = H_1 \dot{\alpha}_1$, $M_{\Gamma_2 \alpha} = H_2 \dot{\alpha}_2$, которые имеют составляющие, параллельные оси OZ: $M_{\Gamma_1 z} = H_1 \dot{\alpha}_1 \cos\alpha_1$, $M_{\Gamma_2 z} = H_2 \dot{\alpha}_2 \cos\alpha_2$.

В силу того, что $H_1 = H_2 = H$ и $\dot{\alpha}_1 = \dot{\alpha}_2 = \dot{\alpha}$, моменты $M_{\Gamma_1 z}$ и $M_{\Gamma_2 z}$ будут равны по значению и направлены в одну сторону. Поэтому через опоры лир *1* и спарник C_β они будут передаваться на объект, стабилизируя его положение по углу ϑ.

При условии, что лира *1* неподвижна и начальный угол β равен нулю ($\beta_0 = 0$), возмущающий момент $M_{вz}$ будет скомпенсирован суммарным гироскопическим моментом:

$$M_{\Gamma z} = M_{\Gamma_1 z} + M_{\Gamma_2 z} = 2H\dot{\alpha}\cos\alpha = M_{вz}.$$

Угловая скорость $\dot{\alpha}$ прецессии гироскопов, необходимая для компенсации возмущающего момента $M_{вz}$ при $\beta = 0$, определяется выражением

$$\dot{\alpha} = \frac{M_{вz}}{2H\cos\alpha}.$$

Аналогично осуществляется пассивная стабилизация по оси OY. Режим пассивной стабилизации не обеспечивает высокой точности стабилизации КА в пространстве.

Двухосные управляющие комплексы на трехстепенных гироскопах в режиме активной стабилизации

Рассмотрим [1, 3, 15], как осуществляется угловая стабилизация КА по оси OY (рис. 10). Допустим, что КА отклонился на угол γ от заданного по-

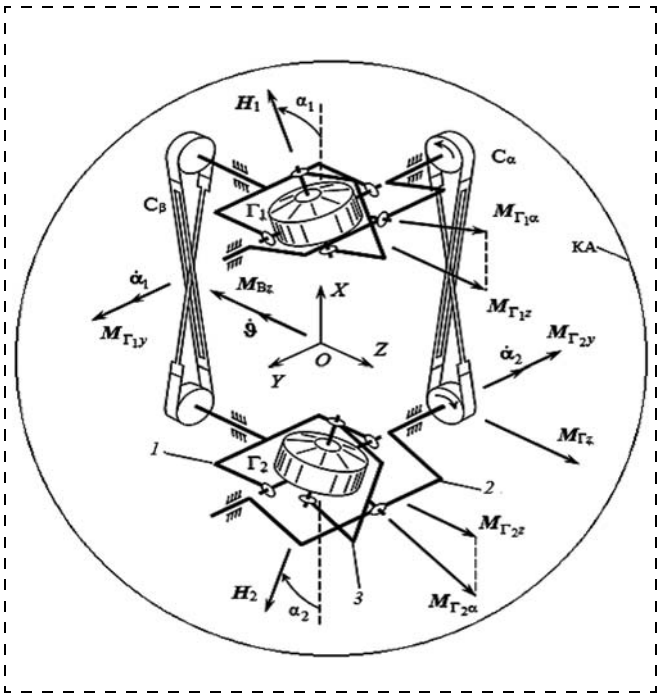

Рис. 9. К пояснению работы гироскопического управляющего комплекса в режиме пассивной стабилизации по оси *OZ* (КА — космический аппарат; $Г_1$, $Г_2$ — гироскопы)

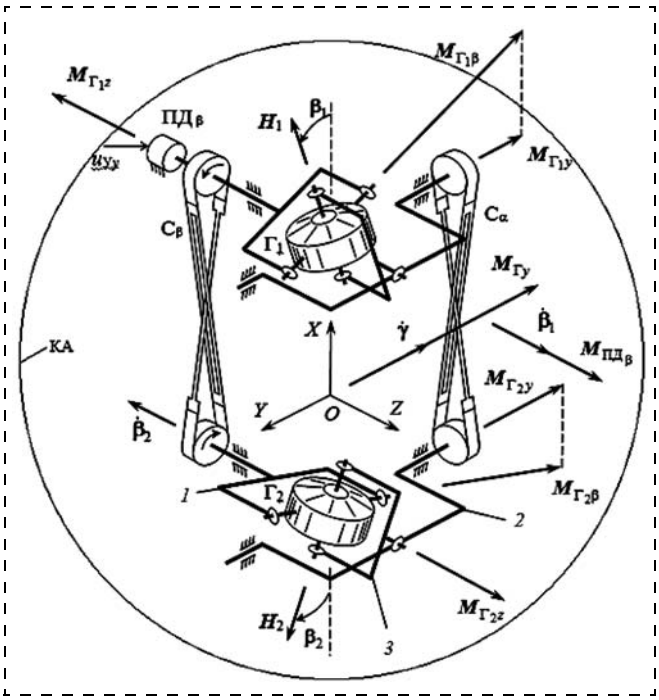

Рис. 10. К пояснению работы гироскопического управляющего комплекса в режиме активной стабилизации по оси *OY* (КА — космический аппарат; $Г_1$, $Г_2$ — гироскопы)

ложения. Управляющий сигнал U_{Y_y}, сформированный в соответствии с принятым законом управления, подается на привод ПД$_\beta$, который формирует момент $M_{\text{ПД}_\beta}$, и начинает разворачивать лиру *1* гироскопа Γ_1 с угловой скоростью $\dot{\beta}_1$ вокруг оси, параллельной оси *OZ*. Через спарник C_β это вращение передается на гироскоп Γ_2, который будет вращаться с такой же угловой скоростью, но в противоположном направлении. В результате вынужденного вращения гироскопов с угловыми скоростями $\dot{\beta}_1$ и $\dot{\beta}_2$ возникают гироскопические моменты $M_{\Gamma_1\beta} = H_1\dot{\beta}_1$, $M_{\Gamma_2\beta} = H_2\dot{\beta}_2$, которые имеют составляющие по осям, параллельным оси *OY*:

$$M_{\Gamma_1 y} = H_1\dot{\beta}_1\cos\beta_1,\ M_{\Gamma_2 y} = H_2\dot{\beta}_2\cos\beta_2.$$

Моменты $M_{\Gamma_1 y}$ и $M_{\Gamma_2 y}$ равны по значению и направлены в одну сторону. Поэтому через опоры лир *2* и спарник C_α они будут передаваться на КА, в сумме образуя управляющий гироскопический момент $M_{\Gamma y}$, который определяется равенством

$$M_{\Gamma y} = M_{\Gamma_1 y} + M_{\Gamma_2 y} = -2H\dot{\beta}\cos\beta.$$

Этот момент вызывает управляемое вращение КА в сторону уменьшения угла γ.

Вращение КА с угловой скоростью через спарник C_α и карданов подвес передается на гироскопы, и по оси *OZ* возникают противоположно направленные гироскопические моменты $M_{\Gamma_1 z}$ и $M_{\Gamma_2 z}$, величины которых определяются выражениями:

$$M_{\Gamma_1 z} = -H_1\dot{\gamma}\cos\beta_1,\ M_{\Gamma_2 z} = H_2\dot{\gamma}\cos\beta_2.$$

Момент $M_{\Gamma_2 z}$ передается через спарник C_β и, складываясь с гироскопическим моментом $M_{\Gamma_1 z}$, препятствует развороту лиры *1* приводом ПД$_\beta$. В результате этого при постоянном управляющем сигнале U_{Y_y}, подаваемом на привод ПД$_\beta$, вращение КА происходит с постоянной угловой скоростью

$$\dot{\gamma} = \frac{M_{\text{ПД}_\beta}}{2H\cos\beta},$$

где $M_{\text{ПД}_\beta}$ — управляющий момент, прикладываемый приводом ПД$_\beta$ к лире *1* и пропорциональный требуемой угловой скорости разворота КА.

Поскольку момент $M_{\text{ПД}_\beta}$, создаваемый приводом, уравновешивается суммарным гироскопическим моментом, который определяется выражением

$$M_{\Gamma z} = M_{\Gamma_1 z} + M_{\Gamma_2 z} = 2\text{H}\dot{\gamma}\cos\beta = M_{\text{ПД}_\beta},$$

то угловая скорость $\dot{\beta}$ поворота лиры *1* будет равна нулю.

Аналогично осуществляется активная стабилизация по оси *OZ*.

В целях предотвращения перевода УК в состояние насыщения при воздействии на корпус КА знакопостоянного возмущающего момента $M_\text{в}$ УК КА реализует режим "разгрузки" силового гироскопа. Наиболее эффективна "разгрузка" с помощью активных способов создания управляющего момента, например с помощью управляющих реактивных двигателей (УРД). Управляющий момент $M_\text{УРД}$, создаваемый УРД, существенно превышает возмущающий момент $M_\text{в}$.

Так как $M_\text{УРД} \gg M_\text{в}$, то "разгрузка" УК осуществляется за малое по сравнению со временем насыщения время.

Заключение

Гиродины (ГУК, СГК) относятся к классу непосредственных гиростабилизаторов, но как самостоятельные объекты изучения не были включены в широко используемый учебник [4], а также и в более поздние издания [5, 6].

Изложенный материал может быть использован как научно-методическая основа для разработки соответствующих разделов учебных курсов, в частности "Теория гироскопических систем", направления подготовки высшего профессионального образования "Системы управления движением и навигация" по программам академического и прикладного бакалавриата.

Список лтературы

1. **Бровкин А. Г., Бурдычов Б. Г., Гордийко С. В.** и др. Бортовые системы управления космическими аппаратами: учебное пособие / Под ред. А. С. Сырова. М.: МАИ-ПРИНТ, 2010. 304 с.
2. **Проблемы** ориентации искусственных спутников "Земли" / Под. ред. С. Ф. Сингера. М.: Наука, главная редакция физ.-мат. литературы, 1966. 451 с.
3. **Ишлинский А. Ю., Борзов В. И., Степаненко Н. П.** Лекции по теории гироскопов. М.: Изд-во Московского университета, 1983. 244 с.
4. **Гироскопические** системы. Гироскопические приборы и системы: учебник для вузов / Под ред. Д. С. Пельпора. 2-е изд. М.: Высшая школа, 1988. 423 с.
5. **Матвеев В. А.** Гироскоп это просто: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. 209 с.
6. **Распопов В. Я.** Теория гироскопических систем. Инерциальные датчики: учеб. пособие. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. 252 с.
7. **Верещагин В. П., Вейнберг Д. М., Стома С. А.** Опыт эксплуатации силовых гироскопов-гиродинов на орбитальном комплексе "МИР" // Труды ВНИИЭМ. М.: Изд-во ВНИИЭМ, 1997. Т. 97. С. 5—12.

8. **Гиросиловая** система ориентации космического аппарата "Ресурс — ДК" / А. В. Сорокин и др. // Матер. XIV С.-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. С.-Петербург: ГНЦ РФ "ЦНИИ Электроприбор", 2002. С. 268—274.

9. **Сомов Е. И.** Динамика прецезионного гиросилового управления космическими аппаратами землеобзора // Гироскопия и навигация. 2002. № 4. С. 123—124.

10. **Силовое** гироскопическое устройство для управления ориентацией космических аппаратов. Патент РФ, № 1839792. Заявка 1562914/28, 4.04.1973.

11. **Силовое** гироскопическое устройство. Патент РФ № 1839791. Заявка 1543336128, 27.12.1971.

12. **Гиростабилизатор.** Патент РФ, № 1839899. Заявка 3053780/28, 22.11. 1988.

13. **Ривкин С. С.** Непосредственные гиростабилизаторы // История механики гироскопических систем. М.: Наука, 1975. С. 82—94.

14. **Распопов В. Я., Малютин Д. М., Иванов Ю. В.** Гироскопы в системах гироскопической стабилизации // Справочник. Инженерный журнал. Приложение. 2009. № 7. С. 52—58.

15. **Ефимов В. В.** Руководство к практическому занятию на тему "Изучение силового гироскопического комплекса". С.-Петербург: Изд. Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 2003. 45 с.

V. Ya. Raspopov, Head of department "Control Equipment", tgupu@yandex.ru,
Tula State University

Gyrodyn as Learning Subject of "Control Systems of Movement and Navigation" Discipline of Higher Professional Education. Part 1. Application, Kinematic and Functioning

The main features of the power gyroscopic complexes of the stabilization and controlling of the spacecrafts as the objects of the research of the academic subject "The systems of the movement control and navigation" are considered in the article. The main definitions, terminology and examples of the gyrodynusage are given. The main modes of operation and the main kinetic schemes of the gyrodyns are described.

The gyrodyns' classification based on the quantity of the control axes and used operating members (two-degree-of-freedom and three-degree-of-freedom gyroscopes) is offered. The numerical values of the gyrodyn main parameters for the small spacecrafts are given. The advantages and disadvantages of the uniaxial and biaxial gyrodyns are mentioned. The necessity of the combination of two gyro units with the loose interlinkingis shown. The role of the precessional engines is shown. The forming of the stabilizing moments in the passive mode of operating and gyroscope controlling moments in the active operating mode are described in details. The forming of the stabilizing and controlling gyroscope moments is considered within the bounds of the precessional theory. The interconnection between the gyrodyn angular velocities and the spacecraft. The analysis of the conditions of the compensation of the disturbance torque with the gyroscopic torque is carried out. The conditions of the compensation for the uniaxial and biaxial gyrodyns are described separately. The references reflect the main questions of the usage, functioning and the kinematic of the gyrodyns. The article material could be used for the creation of the training courses in the academic subject "The systems of the movement control and navigation".

Keywords: *gyrodyn, gyroscope, gyrostabilizer, spacecraft, damping, control, stabilization, work mode*

References

1. **Brovkin A. G., Burdychov B. G., Gordiyko S. V.** i dr. Bortovye sistemy upravleniya kosmicheskimi apparatami: uchebnoe posobie. Pod red. A. S. Syrova. M.: MAI-PRINT, 2010. 304 p.

2. **Problemy** orientatsii iskusstvennykh sputnikov "Zemli": monografiya / Pod. Red. S. F. Singera. M.: Nauka, glavnaya redaktsiya fiz.-mat. literatury, 1966. 451 p.

3. **Ishlinskiy A. Yu., Borzov V. I., Stepanenko N. P.** Lektsii po teorii giroskopov. M.: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1983. 244 p.

4. **Giroskopicheskie** sistemy. Giroskopicheskie pribory i sistemy: uchebnik. dlya vuzov. Pod red. D. S. Pel'pora. 2-e izd. M: Vysshaya shkola, 1988. 423 p.

5. **Matveev V. A.** Giroskop eto prosto: ucheb. posobie. M.: Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2012. 209 p.

6. **Raspopov V. Ya.** Teoriya giroskopicheskikh sistem. Inertsial'nye datchiki: uchebnoe posobie. Tula: Izd-vo TulGU, 2012. 252 p.

7. **Vereshchagin V. P., Veynberg D. M., Stoma S. A.** Opyt ekspluatatsii silovykh giroskopov-girodinov na orbital'nom komplekse "MIR". *Trudy VNIIEM*. M.: Izd-vo VNIIEM, 1997. V. 97. P. 5—12.

8. **Sorokin A. V.** i dr. Girosilovaya sistema orientatsii kosmicheskogo apparata "Resurs — DK". *Mater. XIV S.-Peterburgskoy mezhdunar. konf. po integrirovannym navigatsionnym sistemam*. S.-Peterburg: GNTs RF "TsNII Elektropribor", 2002. P. 268—274.

9. **Somov E. I.** Dinamika pretsezionnogo girosilovogo upravleniya kosmicheskimi apparatami zemleobzora. *Giroskopiya i navigatsiya*. 2002. N. 4. P. 123—124.

10. **Silovoe** giroskopicheskoe ustroystvo dlya upravleniya orientatsiey kosmicheskikh apparatov. Patent RF, № 1839792. Zayavka 1562914/28, 4.04.1973.

11. **Silovoe** giroskopicheskoe ustroystvo. Patent RF № 1839791. Zayavka 1543336128, 27.12.1971.

12. **Girostabilizator.** Patent RF, № 1839899. Zayavka 3053780/28, 22.11. 1988.

13. **Rivkin S. S.** Neposredstvennye girostabilizatory. *Istoriya mekhaniki giroskopicheskikh sistem*. M.: Nauka, 1975. P. 82—94.

14. **Raspopov V. Ya., Malyutin D. M., Ivanov Yu. V.** Giroskopy v sistemakh giroskopicheskoy stabilizatsii. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal. Prilozhenie*. 2009. N. 7. P. 52—58.

15. **Efimov V. V.** Rukovodstvo k prakticheskomu zanyatiyu na temu "Izuchenie silovogo giroskopicheskogo kompleksa". S.-Peterburg: Izd. Voenno-kosmicheskaya akademii im. A. F. Mozhayskogo, 2003. 45 p.

УДК 681.51

Е. С. Лобусов, канд. техн. наук, доц., evgeny.lobusov@yandex.ru,
А. В. Фомичев, канд. техн. наук, доц., a.v.fomichev@bmstu.ru,
МГТУ им. Н. Э. Баумана

Формирование алгоритмов бесплатформенной инерциальной системы навигации и основных режимов функционирования системы управления малогабаритного космического аппарата. Часть 1

Рассмотрено формирование алгоритмов бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС), на базе которой строится и система управления движением на участках управляемого полета малогабаритного космического аппарата (МКА). Для повышения точности БИНС приводятся возможные алгоритмы комплексной обработки информации с использованием бортовых источников информации.

Полученные результаты(подходы, модели и т. д.) могут быть использованы при разработке бесплатформенных систем ориентации и навигации МКА нового поколения, а также при разработке нового и модернизации имеющегося программно-математического обеспечения БИНС МКА.

Ключевые слова: *бесплатформенная инерциальная навигационная система, малый космический аппарат, система управления движением и навигации, схема коррекции, фильтр Калмана*

В условиях широкого внедрения бортовых средств вычислительной техники и информационных технологий все большую актуальность приобретают вопросы исследования и повышения точности бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС), на базе которых осуществляется формирование систем управления движением малогабаритных космических аппаратов (МКА) [1, 8, 9].

В связи с этим представляет интерес рассмотрение возможной совокупности алгоритмов и измерительных средств, с помощью которых реализуются различные режимы функционирования системы управления движением космического аппарата.

По этой причине основное внимание в работе уделяется наиболее, на наш взгляд, важным вопросам получения надлежащей точности функционирования системы управления движением на базе БИНС.

Формирование общей структуры системы управления на борту МКА

Фаза управляемого движения МКА состоит, в общем случае, из последовательности отдельных режимов. Данные режимы обеспечивают выполнение ряда важных целевых задач: мониторинга поверхности Земли, передачу данных, проведения различного рода исследований (например, магнитного поля Земли) и т. д. На рис. 1 показаны некоторые из режимов управляемого движения МКА, относящиеся, в основном, к его режимам ориентации [1, 4, 7, 13], которые являются наиболее распространенными.

С учетом приведенной совокупности режимов можно предложить возможный вариант объединения бортовых измерительных средств и алгоритмов обработки для формирования различных версий, в первую очередь, режимов углового управляемого движения, а также получения информации о движении центра масс. Этот вариант объединения реально реализовать в рамках приводимой на рис. 2 схемы [11, 13].

Приводимая схема сформирована, в основном, на базе использования кинематического принципа [3, 7], предполагающего выделение динамического и кинематического контуров. При этом динамический контур является частью кинематического контура и, считается, не оказывает существенного влияния на его функционирование.

При выполнении определенных переключений отдельных частей схемы рис. 2 возникают те или иные режимы управляемого движения, главным образом, режимы ориентации [1, 4, 7, 13]. Но при этом следует отметить, что блок кинематики (КИН) является частью БИНС и играет важную роль.

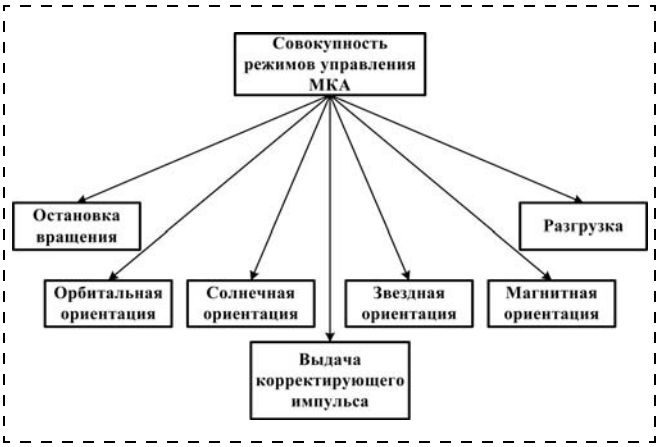

Рис. 1. Режимы управляемого движения МКА

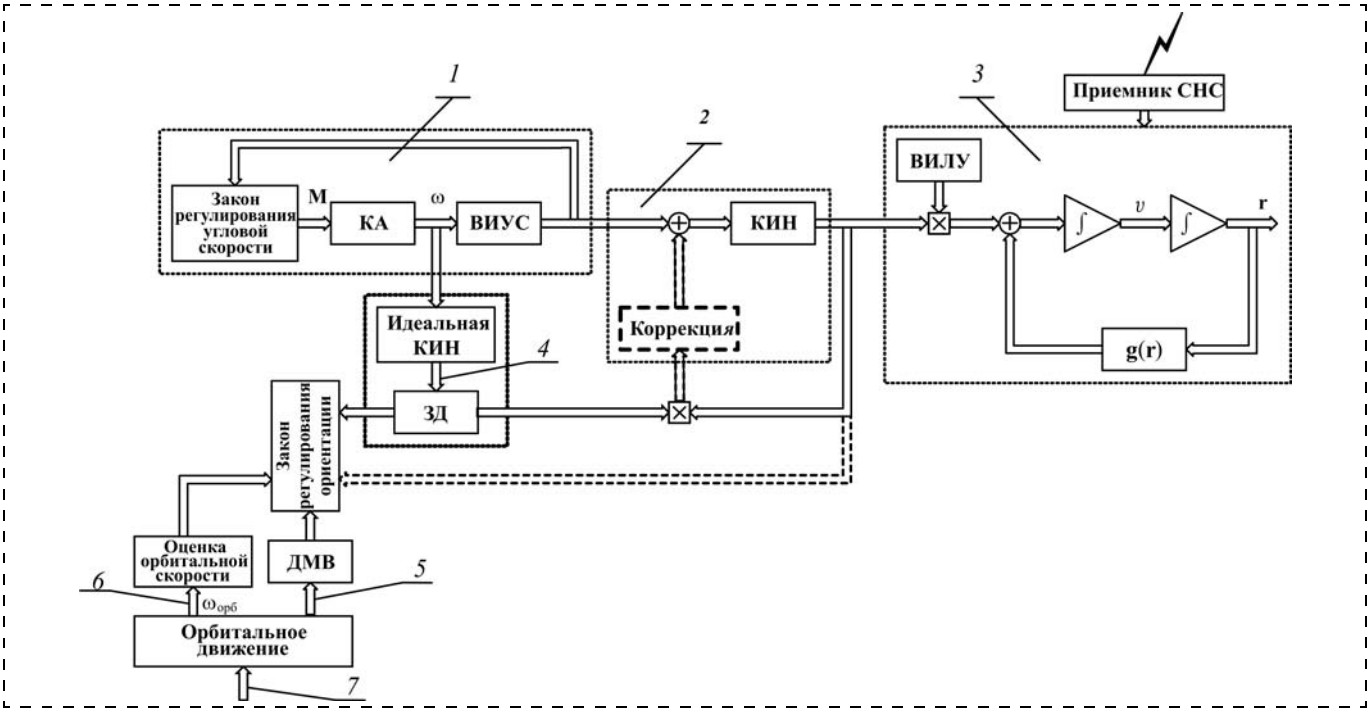

Рис. 2. Схема алгоритмов бортовой системы управления (ориентацией) МКА, включая и БИНС:
1 — динамический контур; *2* — корректируемый контур угловой кинематики; *3* — канал определения положения центра масс (блоки *2* и *3* образуют БИНС); *4* — определение углового положения связанной системы координат (ССК) относительно инерциальной системы координат (ИСК); *5* — определение углового положения ССК относительно орбитальной системы координат (ОСК); *6* — определение орбитальной угловой скорости; *7* — задание параметров орбитального движения; ВИУС — векторный измеритель угловой скорости; ВИЛУ — векторный измеритель линейного ускорения; ДМВ — датчик местной вертикали; КИН — кинематические уравнения углового движения; КА — космический аппарат; ЗД — звездный датчик; СНС — спутниковая навигационная система; **v** — вектор линейной скорости; **r** — радиус-вектор

Корректируемый контур угловой кинематики

Корректируемый контур угловой кинематики позволяет повысить точность интегрирования кинематических уравнений углового движения за счет периодического использования точных сигналов об угловом положении МКА от звездного датчика (ЗД) [1].

Частота интегрирования кинематических уравнений углового движения достаточно велика (100...400 Гц), что позволяет считать обработку практически непрерывной. Однако данные от ЗД об угловом положении МКА в инерциальной системе координат (ИСК) в виде кватерниона поступают со значительно меньшей частотой (обычно не более 10 Гц). Поэтому для восстановления непрерывного сигнала от ЗД возникает необходимость в использовании экстраполятора. Целесообразно использовать экстраполятор первого порядка.

На рис. 3 приведена схема контура коррекции кинематических соотношений, где кинематические уравнения углового движения (блок КИН) представлены в кватернионном виде, а модель векторного измерителя угловой скорости (ВИУС) представляется в простейшем непрерывном виде (показана на рис. 3 над блоком ВИУС). На рис. 3 использованы следующие обозначения: $\delta\boldsymbol{\omega}_{nw}$ — собственная погрешность ВИУС; $\boldsymbol{\omega}_{кор}$ — угловая скорость коррекции; $\delta\mathbf{B}$ — кватернион рассогласования; $\hat{\mathbf{B}}_\gamma$ — вычисляемый кватернион (оценка) углового положения (нижний индекс указывает базис, относительно которого определяется данный кватернион); $\mathbf{B}_\gamma$ — ква-

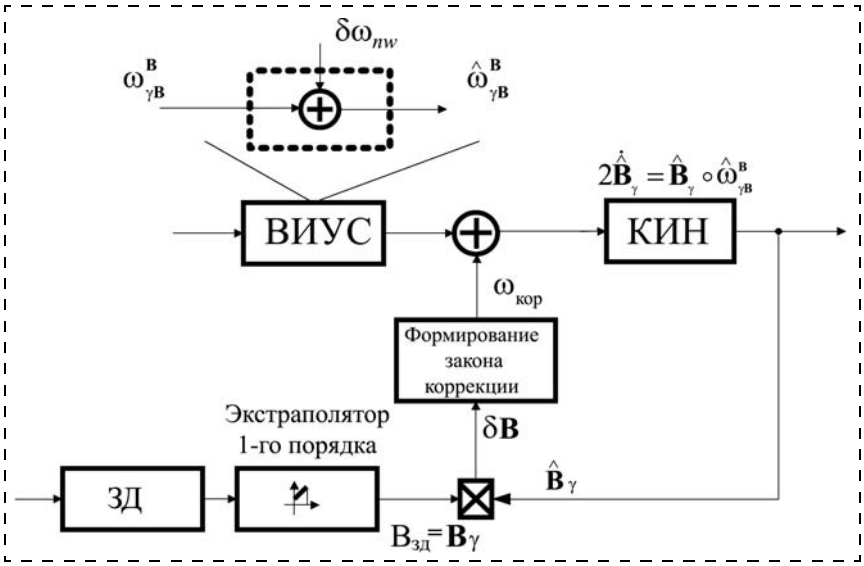

Рис. 3. Блок-схема контура коррекции

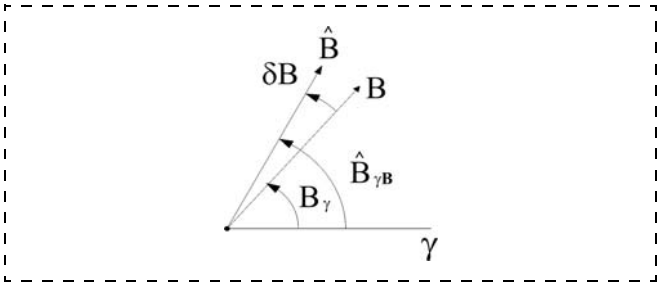

Рис. 4. Используемые при коррекции базисы

тернион точного углового положения; γ — инерциальный базис. Кватернион точного углового положения $\mathbf{B}_\gamma$ считается равным кватерниону, измеряемому звездным датчиком $\mathbf{B}_{ЗД}$, т. е. $\mathbf{B}_\gamma = \mathbf{B}_{ЗД}$.

На рис. 4 показано, как связаны между собой используемые при коррекции координатные базисы: $\mathbf{B}$ (точный), $\hat{\mathbf{B}}$ (вычисляемый) и γ (инерциальный).

Закон коррекции может быть сформирован с использованием различных подходов.

Так как исходные уравнения углового движения являются нелинейными, то для дальнейших исследований можно воспользоваться линеаризованным описанием схемы, представленной на рис. 3.

Обоснованно предполагая, что если угловая скорость коррекции $\boldsymbol{\omega}_{кор}$ и угловое рассогласование, представляемое векторной частью $\nabla\boldsymbol{\theta}/2$ кватерниона рассогласования $\delta\mathbf{B} \cong \langle 1, \nabla\boldsymbol{\theta}/2\rangle$, являются малыми величинами, то тогда линеаризованное описание следует из следующих рассуждений.

Поскольку кинематические уравнения для точного $\mathbf{B}_\gamma$ и вычисляемого базиса $\hat{\mathbf{B}}_\gamma$ углового положения имеют вид

$$2\dot{\mathbf{B}}_\gamma = \mathbf{B}_\gamma \circ \boldsymbol{\omega}^{B}_{\gamma B};$$

$$2\dot{\hat{\mathbf{B}}}_\gamma = \hat{\mathbf{B}}_\gamma \circ \hat{\boldsymbol{\omega}}^{B}_{\gamma B},$$

то кватернион рассогласования $\delta\mathbf{B}$ согласно рис. 4 равен

$$\delta\mathbf{B} = \tilde{\mathbf{B}}_\gamma \circ \hat{\mathbf{B}}_\gamma,$$

где $\tilde{\mathbf{B}}_\gamma$ — сопряженный кватернион.

Путем ряда простейших преобразований получаем дифференциальное уравнение для кватерниона рассогласования

$$2\delta\dot{\mathbf{B}} = \delta\mathbf{B} \circ \hat{\boldsymbol{\omega}}^{B}_{\gamma B} - \boldsymbol{\omega}^{B}_{\gamma B} \circ \delta\mathbf{B}.$$

С учетом того, что

$$\hat{\boldsymbol{\omega}}^{B}_{\gamma B} = \boldsymbol{\omega}^{B}_{\gamma B} + \delta\boldsymbol{\omega}_{nw} + \boldsymbol{\omega}_{кор},$$

окончательно получаем искомую форму линеаризованного описания

$$2\delta\dot{\mathbf{B}} = \delta\mathbf{B} \circ (\boldsymbol{\omega}_{кор} + \delta\boldsymbol{\omega}_{nw}) + \delta\mathbf{B} \circ \boldsymbol{\omega}^{B}_{\gamma B} - \boldsymbol{\omega}^{B}_{\gamma B} \circ \delta\mathbf{B}.$$

Принимая во внимание наличие величин второго порядка малости (переменные $\boldsymbol{\omega}_{кор}$, $\nabla\boldsymbol{\theta}/2$, $\delta\boldsymbol{\omega}_{nw}$ являются малыми), полученное выражение можно существенно упростить и привести к виду

$$\nabla\dot{\boldsymbol{\theta}} \cong -\boldsymbol{\omega}^{*B}_{\gamma B}\nabla\boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\omega}_{кор} + \delta\boldsymbol{\omega}_{nw},$$

где

$$\boldsymbol{\omega}^{*B}_{\gamma B} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{bmatrix}; \ \nabla\boldsymbol{\theta} = [\nabla\theta_1, \nabla\theta_2, \nabla\theta_3]^{T};$$

$$\boldsymbol{\omega}_{кор} = [\omega_{1k}, \omega_{2k}, \omega_{3k}]^{T},$$

$$\delta\boldsymbol{\omega}_{nw} = [\delta\omega_{1nw}, \delta\omega_{2nw}, \delta\omega_{3nw}]^{T}.$$

В стандартной форме записи данное уравнение представляется в виде

$$\delta\dot{\mathbf{x}} \cong \mathbf{A}\delta\mathbf{x} + \delta\mathbf{u} + \mathbf{w};$$

$$\delta\mathbf{y} = \mathbf{C}\delta\mathbf{x} + \mathbf{v},$$

где $\delta\mathbf{x}$ — вектор состояния системы размерности (3×1); $\delta\mathbf{u}$ — вектор управления размерности (3×1); $\mathbf{A}$ — матрица состояния системы размерности (3×3); $\mathbf{C} = \mathbf{I}$ — матрица выхода системы (единичная) размерности (3×3); $\mathbf{w}$ — вектор шума размерности (3×1), $\mathbf{v}$ — измерительный шум размерности (3×1).

Знание линеаризованных уравнений, записанных в стандартной форме и при традиционных предположениях относительно статистических свойств воздействий $\mathbf{w}$ и $\mathbf{v}$, позволяет воспользоваться результатами калмановской фильтрации для формирования обратной связи — закона коррекции.

Расчет коэффициента фильтра Калмана $K^{Ф}$ [5, 10] в составе структуры, приведенной на рис. 5, происходит по соотношениям, непосредственно показанным на этом же рисунке.

Недостаток подхода с использованием фильтра Калмана связан с незнанием статистических характеристик собственных погрешностей ВИУС и неопределенностью задания уровня шума измерения для данных от ЗД.

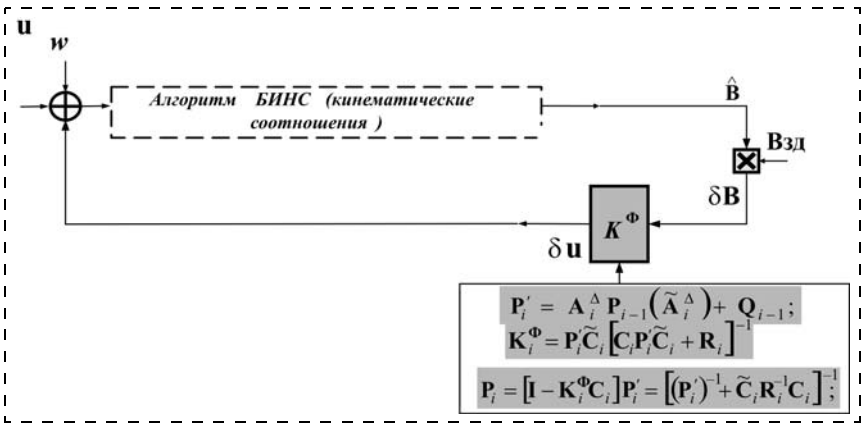

Рис. 5. Фильтр Калмана в составе корректирующего контура

Поэтому часто оказывается целесообразнее использовать подходы классической теории регулирования и алгебру кватернионов [3].

Теперь текущая угловая ошибка оценивается векторной частью кватерниона рассогласования $\delta\mathbf{B}$:

$$\delta\mathbf{B} = \tilde{\mathbf{B}}_\gamma \circ \hat{\mathbf{B}}_\gamma .$$

В работе [3] показано, как обеспечить асимптотическую устойчивость контура коррекции за счет выбора определенного закона регулирования.

В простейшем виде коэффициент закона регулирования $\mathbf{K}$ соответствует векторной константе, выбираемой из условия получения определенного качества переходного процесса в контуре коррекции. В этом случае устранение рассогласования происходит по кратчайшему угловому расстоянию.

Возможен еще один вариант формирования контура коррекции (обратной связи). Так как показания ЗД считаются эталонными, то эти показания можно периодически подставлять в качестве начальных условий в процедуру интегрирования кинематических соотношений.

Корректируемый алгоритм навигации

Корректируемый алгоритм навигации позволяет повысить точность расчета навигационных переменных вектора линейной скорости и радиус-вектора положения МКА в инерциальной системе координат (ИСК).

Уравнение навигации записывается в геоцентрической экваториальной системе координат:

$$\dot{\upsilon}^\gamma = \mathbf{a}^\gamma + \mathbf{g}^\gamma(\mathbf{r}^\gamma), \qquad (1)$$

где υ^γ — вектор абсолютной линейной скорости в ИСК; $\mathbf{a}^\gamma$ — вектор кажущегося ускорения в ИСК; $\mathbf{r}^\gamma$ — радиус-вектор в ИСК; $\mathbf{g}^\gamma(\mathbf{r}^\gamma)$ — вектор гравитационного ускорения.

К уравнению (1) добавляется и дифференциальное уравнение для радиус-вектора:

$$\dot{\boldsymbol{r}}^\gamma = \upsilon^\gamma. \qquad (2)$$

Поскольку реализация уравнений (2) и (3) происходит с погрешностями, то в действительности уравнения (1) и (2) записываются относительно оценок.

Общая схема БИНС в ИСК приведена на рис. 6, где символом "^" определяются оценки переменных; ВИУС — векторный измеритель угловой скорости; ВИЛУ — векторный измеритель линейных ускорений.

Начальные условия по вектору состояния уравнения (1) $[d\mathbf{r}^\gamma/dt,\ \mathbf{r}^\gamma]^{\mathrm{T}}|_{t=0}$ задаются для звездного времени.

Кинематические уравнения углового движения, записанные с помощью кватернионов, приведены выше (см. предыдущий раздел).

Оценки для измеряемых переменных угловой скорости и линейного ускорения чаще всего представляются в виде суммы собственных шумов и нескомпенсированных (т. е. остаточных после калибровки) постоянных составляющих измерителей:

- для абсолютной угловой скорости МКА в базисе $\mathbf{B}$

$$\hat{\boldsymbol{\omega}}^{\mathrm{B}}_{\gamma\mathrm{B}} = \boldsymbol{\omega}^{\mathrm{B}}_{\gamma\mathrm{B}} + \delta\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{B}}_{nw},$$

где угловая скорость собственных возмущений ВИУС $\delta\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{B}}_{nw} = \delta\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{B}}_{n} + \mathbf{w}^{\mathrm{B}}_{\omega}$, $\delta\dot{\boldsymbol{\omega}}^{\mathrm{B}}_{n} = 0$; $\mathbf{w}^{\mathrm{B}}_{\omega}$ — собственный шум;

- для линейного ускорения

$$\hat{\mathbf{a}}^{\mathrm{B}} = \mathbf{a}^{\mathrm{B}} + \delta\mathbf{a}^{\mathrm{B}}_{nw},$$

где ускорение от собственных возмущений $\delta\mathbf{a}^{\mathrm{B}}_{nw} = \delta\mathbf{a}^{\mathrm{B}}_{n} + \mathbf{w}^{\mathrm{B}}_{a}$; $\delta\dot{\mathbf{a}}^{\mathrm{B}}_{n} = 0$; $\mathbf{w}^{\mathrm{B}}_{a}$ — собственный шум.

При использовании линеаризации исходных уравнений углового движения и движения центра масс имеем уравнения в отклонениях от некоторого опорного движения, характеризуемого переменными $\mathbf{r}_0$ и υ_0, т. е. $\mathbf{r}^\gamma = \mathbf{r}_0 + \delta\mathbf{r}$, $\upsilon^\gamma = \upsilon_0 + \delta\upsilon$:

$$\delta\dot{\upsilon}^\gamma = \delta\mathbf{a}^\gamma + \delta\mathbf{g}^\gamma(\mathbf{r}^\gamma); \qquad (3)$$

$$\delta\dot{\boldsymbol{r}}^\gamma = \delta\upsilon^\gamma. \qquad (4)$$

Ограничимся использованием при выводе *центрального поля* тяготения. Тогда для гравитационного ускорения

$$\mathbf{g}^\gamma(\mathbf{r}^\gamma) \triangleq \mathbf{g}(\mathbf{r}) = -\frac{\mu}{r^3}\mathbf{r}; \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \mathbf{g}(\mathbf{r}) \cong -\frac{\mu}{r_0^3}\mathbf{r}_0\left[1 - 3(\mathbf{n}_0\cdot\delta\mathbf{r})\frac{1}{r_0}\right] - \frac{\mu}{r_0^3}\delta\mathbf{r}$$

и

$$\delta\mathbf{g}^\gamma(\mathbf{r}^\gamma) = \frac{\mu}{r_0^3}\mathbf{r}_0\left[3(\mathbf{n}_0\cdot\delta\mathbf{r})\frac{1}{r_0}\right] - \frac{\mu}{r_0^3}\delta\mathbf{r},$$

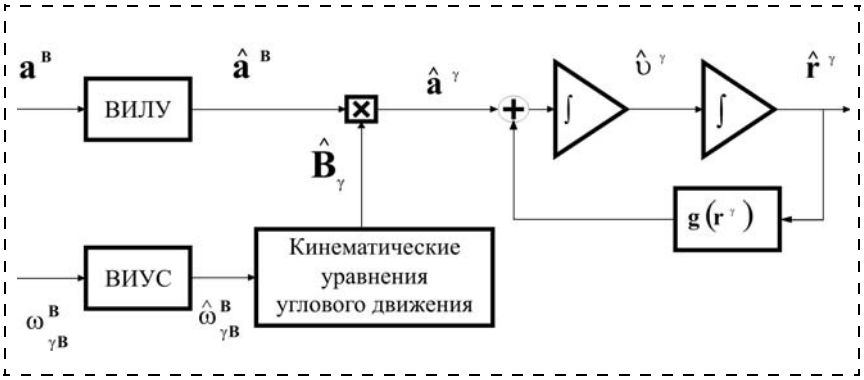

Рис. 6. Блок-схема БИНС в ИСК

так как

$$r^{-3} = (r^2)^{-3/2} =$$
$$= ((\mathbf{r}_0 + \delta\mathbf{r}) \cdot (\mathbf{r}_0 + \delta\mathbf{r}))^{-3/2} \cong r_0^{-3}\left[1 - 3(\mathbf{n}_0 \cdot \delta\mathbf{r})\frac{1}{r_0}\right];$$

$\mathbf{n}_0 = \mathbf{r}_0/r_0 = [n_{01}, n_{02}, n_{03}]^{\mathrm{T}}$ — единичный вектор; $(\mathbf{n}_0 \cdot \delta\mathbf{r})$ — скалярное произведение векторов $\mathbf{n}_0$ и $\delta\mathbf{r}$.

В действительности существует угловая погрешность построения инерциального базиса γ, т. е. результатом расчета является оценка положения инерциального базиса $\hat{\gamma} \triangleq$ М. По этой причине возникает и погрешность по кажущемуся ускорению $\delta\mathbf{a}^{\gamma}$, которая представляется в следующем матричном виде:

$$\delta\mathbf{a}^{\gamma} \cong \mathbf{M}_{\gamma}^{0}\,\widetilde{\mathbf{B}}_{\gamma}\mathbf{a}^{\mathrm{B}} + \widetilde{\mathbf{B}}_{\gamma}\,\delta\mathbf{a}_{n}^{\mathrm{B}} = (\widetilde{\mathbf{B}}_{\gamma}^{*}\mathbf{a}^{\mathrm{B}})\nabla\boldsymbol{\theta} + \widetilde{\mathbf{B}}_{\gamma}\,\delta\mathbf{a}_{nw}^{\mathrm{B}}.$$

Матрица $\mathbf{M}_{\gamma}^{0}$, определяемая выражением

$$\mathbf{M}_{\gamma}^{0} = \begin{bmatrix} 0 & 2\lambda_2 & -2\lambda_2 \\ -2\lambda_3 & 0 & 2\lambda_1 \\ 2\lambda_2 & -2\lambda_1 & 0 \end{bmatrix},$$

где $\langle \mathbf{M}_{\gamma}^{0} \rangle \approx \langle 1, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \rangle$ — кватернион углового рассогласования, $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]^{\mathrm{T}}$ — векторная часть кватерниона углового рассогласования, а $\nabla\boldsymbol{\theta} = [2\lambda_1\ 2\lambda_2\ 2\lambda_3]^{\mathrm{T}}$ — вектор углового рассогласования (угловая погрешность), характеризует отклонение рассчитываемого базиса М от положения истинного базиса γ.

В результате объединенное линеаризованное уравнение движения БИНС в отклонениях имеет вид

$$\dot{\mathbf{x}} = \boldsymbol{\Pi}\mathbf{x} - \begin{bmatrix} \widetilde{\mathbf{B}}_{\mathrm{M}} \\ \mathbf{O}_{6\times3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{n1}^{\mathrm{B}} \\ \omega_{n2}^{\mathrm{B}} \\ \omega_{n3}^{\mathrm{B}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{6\times3} \\ \widetilde{\mathbf{B}}_{\mathrm{M}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{n1}^{\mathrm{B}} \\ a_{n2}^{\mathrm{B}} \\ a_{n3}^{\mathrm{B}} \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{x} = [2\lambda_1, 2\lambda_2, 2\lambda_3, \delta r_1, \delta r_2, \delta r_3, \delta\upsilon_1, \delta\upsilon_2, \delta\upsilon_3]^{\mathrm{T}}$;

$$\boldsymbol{\Pi} =$$
$$= \left[\begin{array}{c:c:c} \mathbf{O}_{3\times3} & \mathbf{O}_{3\times3} & \mathbf{O}_{3\times3} \\ \hdashline \mathbf{O}_{3\times3} & \mathbf{O}_{3\times3} & \begin{matrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{matrix} \\ \hdashline \begin{matrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} \mu r_0^{-3}(3n_{01}^2 - 1) & 3\mu r_0^{-3} n_{01} n_{02} & 3\mu r_0^{-3} n_{01} n_{03} \\ 3\mu r_0^{-3} n_{02} n_{01} & \mu r_0^{-3}(3n_{02}^2 - 1) & 3\mu r_0^{-3} n_{02} n_{03} \\ 3\mu r_0^{-3} n_{03} n_{01} & 3\mu r_0^{-3} n_{03} n_{02} & \mu r_0^{-3}(3n_{03}^2 - 1) \end{matrix} & \mathbf{O}_{3\times3} \end{array}\right];$$

$\mathbf{a} = [a_1, a_2, a_3]^{\mathrm{T}}$ — вектор опорного линейного ускорения в проекциях на оси инерциальной системы координат (ИСК);

$\mathbf{a}_n^{\mathrm{B}} = [a_{n1}^{\mathrm{B}}, a_{n2}^{\mathrm{B}}, a_{n3}^{\mathrm{B}}]^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{\omega}_n^{\mathrm{B}} = [\omega_{n1}^{\mathrm{B}}, \omega_{n2}^{\mathrm{B}}, \omega_{n3}^{\mathrm{B}}]^{\mathrm{T}}$ — векторы собственных погрешностей ВИЛУ и ВИУС;

$2\boldsymbol{\lambda} = [2\lambda_1, 2\lambda_2, 2\lambda_3]^{\mathrm{T}}$, $\delta\mathbf{r} = [\delta r_1, \delta r_2, \delta r_3]^{\mathrm{T}}$, $\delta\boldsymbol{\upsilon} = [\delta\upsilon_1, \delta\upsilon_2, \delta\upsilon_3]^{\mathrm{T}}$ — векторы погрешности определения углов, местоположения и линейной скорости;

$\mathbf{B}_{\mathrm{M}} \approx \mathbf{B}_{\gamma}$ — матрица положения базиса ССК относительно базиса М;

$\mathbf{O}_{3\times3}$, $\mathbf{O}_{6\times3}$ — нулевые матрицы соответствующих размеров.

Проведенный анализ показывает влияние погрешностей от углового канала при наличии кажущегося ускорения.

Используя линеаризованные уравнения, теперь можно воспользоваться фильтрацией по Калману. И в этом случае можно предложить несколько вариантов коррекции, например, отдельно для углового движения и отдельно для движения центра масс и т. д.

Список литературы

1. **Анучин О. Н., Комарова И. Э., Порфирьев Л. Ф.** Бортовые системы навигации и ориентации искусственных спутников Земли. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2004.
2. **Бабич О. А.** Обработка информации в навигационных комплексах. М.: Машиностроение, 1991.
3. **Бранец В. Н., Шмыглевский И. П.** Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем. М.: Наука, 1991.
4. **Лебедев Д. В., Ткаченко А. И.** Системы инерциального управления. Алгоритмические аспекты. Киев: Наукова думка, 1991.
5. **Лобусов Е. С., Фомичев А. В.** Дискретный фильтр Калмана и его практическое применение в задачах обработки информации и управления // Актуальные проблемы развития отечественной космонавтики: Матер. XXVIII академ. чтений по космонавтике. М.: Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, 2004. С. 381—382.
6. **Лобусов Е. С., Фомичев А. В.** Моделирование режимов системы управления перспективного малогабаритного космического аппарата для фундаментальных научных исследований // Актуальные проблемы развития отечественной космонавтики: Тр. XXXVI академ. чтений по космонавтике. М.: Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, 2012. С. 471—472.
7. **Lobusov, E., Fomichev A., Parisi M.** Kinematic approach implementation in developing of attitude control system for small-sized spacecraft // Intelligent Systems: Proceed. of the Tenth Internat. Symposium. Moscow: RUSAKI, 2012. P. 361—363.
8. **Лобусов Е. С., Фомичев А. В.** Разработка и исследование алгоритмического обеспечения БИНС для системы управления движением и навигации перспективного малогабаритного космического аппарата // Актуальные проблемы развития отечественной космонавтики: Тр. XXXVII академ. чтений по космонавтике. М.: Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, 2013. С. 537—538.
9. **Современные** информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / Под ред. М. Н. Красильщикова и Г. Г. Себрякова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.
10. **Фильтрация** и стохастическое управление в динамических системах / Под ред. К. Т. Леондеса. М.: Мир, 1980.
11. **Hughes P. C.** Spacecraft Attitude Dynamics. New York: John Wiley and Sons, 2006.
12. **Savage P. G.** Strapdown Analytics. Minnesota: Strapdown Associates, Inc. Maple Plain, 2000. V. 1, 2.
13. **Tuthill J.** Design and Simulation of a Nano-Satellite Attitude Determination System. M. Sc. Thesis, Naval Postgraduate School, United States, 2009.
14. **Titterton D. H., Weston J. L.** Strapdown Inertial Navigation Technology. The Institution of Electrical Engineers, 2004.

E. S. Lobusov, Associate professor, evgeny.lobusov@yandex.ru,
A. V. Fomichev, Associate Professor, Deputy Head of Department, a.v.fomichev@bmstu.ru
Bauman Moscow State Technical University

Forming of Strapdown Inertial Navigation System Algorithms and Main Control Modes for Small-Sized Spacecraft. Part 1

It is considered the forming of Strapdown Inertial Navigation System (SINS) which is the base of spacecraft control system. The main problem is accuracy one so it is necessary to use and implement integrated navigation systems. During outer space flight onboard devices measurements and external navigation aids can be introduced.

It is shown how to organize software algorithms for orientation system relying on so called kinematic principle. Different control modes may be easily realized within the scope of suggested structure. Here the kinematic loop mainly kinematic equations is the subject of investigation. So a specific attention is given to integration methods examination for kinematic equations of angular motion and ways of improving it.

The results (methods, models, software and algorithmic support) can be used when developing strapdown systems orientation and navigation of a new generation of small-sized spacecraft, as well as the development of new and modifying of existing software of small-sized spacecraft SINS.

Keywords: *onboard sensors, strapdown inertial navigation system, a small-sized spacecraft, navigation and orientation control system, integration methods, correction processing scheme, the Kalman filter*

References

1. **Anuchin O. N., Komarova I. E., Porfir'ev L. F.** Bortovye sistemy navigatsii i orientatsii iskusstvennykh sputnikov Zemli. SPb.: GNTs RF TsNII "Elektropribor", 2004.
2. **Babich O. A.** Obrabotka informatsii v navigatsionnykh kompleksakh. M.: Mashinostroenie, 1991.
3. **Branets V. N., Shmyglevskiy I. P.** Vvedenie v teoriyu besplatformennykh inertsial'nykh navigatsionnykh sistem. M.: Nauka, 1991.
4. **Lebedev D. V., Tkachenko A. I.** Sistemy inertsial'nogo upravleniya. Algoritmicheskie aspekty. Kiev: Naukova dumka, 1991.
5. **Lobusov E. S., Fomichev A. V.** Diskretnyy fil'tr Kalmana i ego prakticheskoe primenenie v zadachakh obrabotki informatsii i upravleniya. *Aktual'nye problemy razvitiya otechestvennoy kosmonavtiki: Mater. XXVIII akadem. chteniy po kosmonavtike.* M.: Komissiya RAN po razrabotke nauchnogo naslediya pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva, 2004. P. 381—382.
6. **Lobusov E. S., Fomichev A. V.** Modelirovanie rezhimov sistemy upravleniya perspektivnogo malogabaritnogo kosmicheskogo apparata dlya fundamental'nykh nauchnykh issledovaniy. *Aktual'nye problemy razvitiya otechestvennoy kosmonavtiki: Tr. XXXVI akadem. chteniy po kosmonavtike.* M.: Komissiya RAN po razrabotke nauchnogo naslediya pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva, 2012. P. 471—472.
7. **Lobusov, E., Fomichev A., Parisi M.** Kinematic approach implementation in developing of attitude control system for small-sized spacecraft. *Intelligent Systems: Proceed. of the Tenth Internat. Symposium.* Moscow: RUSAKI, 2012. P. 361—363.
8. **Lobusov E. S., Fomichev A. V.** Razrabotka i issledovanie algoritmicheskogo obespecheniya BINS dlya sistemy upravleniya dvizheniem i navigatsii perspektivnogo malogabaritnogo kosmicheskogo apparata. *Aktual'nye problemy razvitiya otechestvennoy kosmonavtiki: Tr. XXXVII akadem. chteniy po kosmonavtike.* M.: Komissiya RAN po razrabotke nauchnogo naslediya pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva, 2013. P. 537—538.
9. **Sovremennye** informatsionnye tekhnologii v zadachakh navigatsii i navedeniya bespilotnykh manevrennykh letatel'nykh apparatov. Pod red. M. N. Krasil'shchikova i G. G. Sebryakova. M.: FIZMATLIT, 2009.
10. **Fil'tratsiya** i stokhasticheskoe upravlenie v dinamicheskikh sistemakh. Pod red. K. T. Leondesa. M: Mir, 1980.
11. **Hughes P. C.** Spacecraft Attitude Dynamics. New York: John Wiley and Sons, 2006.
12. **Savage P. G.** Strapdown Analytics. Minnesota: Strapdown Associates, Inc. Maple Plain, 2000. V. 1, 2.
13. **Tuthill J.** Design and Simulation of a Nano-Satellite Attitude Determination System. M. Sc. Thesis, Naval Postgraduate School, United States, 2009.
14. **Titterton D. H., Weston J. L.** Strapdown Inertial Navigation Technology. The Institution of Electrical Engineers, 2004.

ИНФОРМАЦИЯ

С 17 по 19 апреля 2015 г. в МГТУ им. Н. Э. Баумана состоится международная конференция

"УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ В ИНЖЕНЕРНЫХ ПРИЛОЖЕНИЯХ" (ICIPCE—2015)

Организаторы конференции:
— Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
— Нанкинский политехнический университет (NJUST),
— Научно-инженерный институт (SCIEI).

Сопредседатели программного комитета конференции: *проф.* **А. А. Александров** и *проф.* **Ван Сяофэн**

Научные направления конференции

- Инженерные решения задач управления подвижными объектами
- Современные информационные технологии
- Системы ориентации, стабилизации и навигации
- Состояние и перспективы развития теории и систем управления
- Компьютерные системы и сети
- Бортовое и наземное инженерное оборудование и перспективы его совершенствования
- Современные педагогические концепции в мировом образовательном пространстве

Подробную информацию о конференции см. сайте: **http://icipce.org/Russian.html**

Указатель статей, опубликованных в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление" в 2014 году

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Александров А. Ю., Александрова Е. Б., Жабко А. П. Анализ устойчивости гироскопических систем с запаздыванием на основе прямого метода Ляпунова. № 5.

Александров А. Ю., Александрова Е. Б. Одноосная стабилизация твердого тела при наличии запаздывания в обратной связи. № 12.

Аль-Сабул Али Хусейн Хасан, Грачев А. Н. Параметрическая идентификация линейных динамических объектов с использованием быстрого генетического алгоритма. № 8.

Анисимов Д. Н., Дроздова Е. Д., Новиков В. Н. Исследование свойств нечеткого аппроксимирующего ПД регулятора. № 9.

Ахметсафин Р. Д., Ахметсафина Р. З. О реализации линеаризующего компенсатора для одного класса нелинейных моделей. № 2.

Ахметсафин Р. Д., Ахметсафина Р. З. Вычислительные затраты пошаговых методов поиска при идентификации регрессионных моделей. № 4.

Барабанов А. Т. Метод А. Н. Крылова в задаче построения модели линейной системы в области изображений. № 2.

Бобырь М. В., Титов В. С., Милостная Н. А. Прогнозирование работы мехатронных систем на основе мягких нечетких баз знаний. Часть 1. № 10.

Бобырь М. В., Титов В. С., Милостная Н. А. Прогнозирование работы мехатронных систем на основе мягких нечетких баз знаний. Часть 2. № 11.

Быстров Л. Г. Идентификация линейных динамических систем по измеряемым координатам переменных состояния. № 1.

Гайдук А. Р., Плаксиенко Е. А. Условия реализуемости передаточных функций системой с частично заданной структурой. № 4.

Ильин Е. Д., Ширяев В. И. О гарантированном оценивании возмущений в линейных динамических системах. № 9.

Кириллов Н. П. Метод комбинированного концептуального моделирования технических систем. № 2.

Косов А. А. О построении стабилизирующего управления для одной механической системы с переключениями. № 12.

Кучеренко П. А., Соколов С. В. Алгоритмы нелинейной фильтрации в задаче структурной идентификации многоструктурных стохастических объектов. № 6.

Ловчаков В. И. Функции переключения оптимального по быстродействию регулятора для четырехкратного интегратора. № 9.

Некрасов И. В. Оптимизация ступенчатого управления дискретной системой методом частично-целочисленного программирования. № 3.

Потапов В. И. Математическая модель и алгоритм оптимального управления подвижным объектом в конфликтной ситуации. № 7.

Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Гибридная схема решения задачи линейного быстродействия на основе формализма полиэдральной оптимизации. № 7.

Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Робастная коррекция в системах управления с большим коэффициентом усиления. № 12.

Хорошавин В. С., Зотов А. В., Ишутинов Д. В. Исследование эффективности систем управления нелинейным динамическим объектом второго порядка с экстремальной статической характеристикой. № 2.

Чебурахин И. Ф., Егорова Е. К. Автоматизация конструирования определенных счетных классов булевых функций и минимизация их сложности. № 8.

Шелудько А. С., Ширяев В. И. Алгоритм минимаксной фильтрации для одномерного хаотического процесса. № 5.

Ширяев В. И., Подивилова Е. О. Аппроксимация информационных множеств в задаче гарантированного оценивания состояния динамических систем в условиях неопределенности. № 7.

Ядыкин И. Б. Частотный метод анализа устойчивости слабоустойчивых линейных динамических систем. № 3.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Ахметсафин Р. Д., Ахметсафина Р. З. Оптимизация вычислений при применении генетических алгоритмов в задаче структурно-параметрической идентификации регрессионных моделей. № 11.

Глазков В. П., Большаков А. А., Кулик А. А. Использование нейросетевого компенсатора для стабилизации движения полуавтоматических протезируемых систем. № 1.

Жернаков С. В., Равилов Р. Ф. Вычисление параметров масляной системы авиационного ГТД на основе технологий нейронных сетей. № 2.

Ильясов Б. Г., Герасимова И. Б., Мухамедрахимова Л. Н. Когнитивная модель самоорганизации процессов управления в малых научных группах. № 1.

Каляев И. А., Котов В. Н., Щербинин И. П., Красильщиков М. Н., Евдокименков В. Н. Особенности программно-аппаратной реализации рас-

пределенной информационной системы мониторинга технического состояния элементов подвижного состава РЖД. № 3.

Карабутов Н. Н., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П. Модели адаптивного управления на базе ассоциативной памяти. № 12.

Осипов В. Ю. Развитие процессов обработки информации в ассоциативных интеллектуальных машинах. № 6.

Скобелев П. О., Симонова Е. В., Кожевников С. С., Майоров И. В. Разработка мультиагентной системы планирования, прогнозирования и моделирования производства. № 1.

Самигулина Г. А., Самигулина З. И. Сбор данных с реального объекта и организация информационного обмена с интеллектуальной системой управления на основе искусственных иммунных сетей. № 2.

Сластников С. А. Решение задач маршрутизации транспорта методом муравьиных колоний. № 1.

Чубуков Н. Н. Геометризация задачи экологического контроля содержания вредных веществ в атмосферном воздухе на автомобильных дорогах. № 1.

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Абрамов В. В., Иванюгин В. М., Петухов С. В. Система технического зрения для роботизации отделки (шпаклевки) железобетонных изделий. № 6.

Горитов А. Н. Управление роботом-манипулятором в среде с неполной информацией. № 6.

Градецкий В. Г., Князьков М. М., Крюкова А. А., Семёнов Е. А., Суханов А. Н., Фомин Л. Ф. Динамика вакуумных контактных устройств мобильных роботов. № 9.

Гриценко П. А., Арановский С. В. Нахождение оптимальной траектории движения по заданному пути для кинематически избыточного манипулятора. № 1.

Жиденко И. Г., Кутлубаев И. М. Методика определения сигналов управления антропоморфным манипулятором. № 5.

Крахмалев О. Н., Петрешин Д. И. Исследование движения манипуляционных роботов на основе анализа параметров инерции. № 10.

Кулаков Ф. М., Шмыров А. С., Шиманчук Д. В. Управление космическим роботом с использованием неустойчивой точки либрации. № 7.

Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Диане С. А. К. Способы представления знаний и особенности функционирования мультиагентных робототехнических систем. № 1.

Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Диане С. А. К., Трипольский П. Э., Карпов С. А. Модели и алгоритмы оценки численности состава мультиагентных робототехнических систем. № 3.

Назарова А. В., Рыжова Т. П. Система управления коллективом мобильных роботов. № 4.

Погосов Д. Б. Позиционно-траекторное управление с учетом требований к мощности на примере гусеничных роботов. № 11.

Притыкин Ф. Н., Гордеев О. И. Обобщенный метод определения угла сервиса для плоских незамкнутых механизмов манипуляторов на основе анализа мгновенных состояний. № 4.

Турыгин Ю. В., Зубкова Ю. В., Гартянски Р. Исследование точности позиционирования выходного звена манипулятора автоматизированного электронно-лучевого технологического комплекса. № 7.

Тягунов О. А., Теплов М. А. Парето-оптимальная настройка типовых регуляторов в системе стабилизации курса мобильного робототехнического комплекса. № 9.

Филаретов В. Ф., Коноплин А. Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Часть 2. № 7.

Щербатов И. А., Проталинский И. О., Бородин В. А. Система интерпретирования голосовых команд для управления мобильным роботом. № 6.

Шоланов К. С. Синтез кинематической схемы и решение задачи позиционирования нового параллельного манипулятора. № 11.

МОДЕЛИРОВАНИЕ, КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Андреев С. М., Галдин М. С. Математическая модель теплового режима валковой разливки стали. № 10.

Андриевский Б. Р., Кузнецов Н. В., Леонов Г. А., Погромский А. Ю. Распределенное управление нелинейной производственной системой. № 5.

Большаков А. А., Кулик А. А., Глазков В. П., Лобанов В. В. Разработка системы контроля режима технологической тренировки приемно-усилительных ламп. № 9.

Будко П. А., Литвинов А. И. Кинетический метод контроля и диагностики технических средств. № 7.

Будко Н. П., Будко П. А., Литвинов А. И., Виноградeнко А. М. Реализация кинетического метода контроля и диагностики технических средств. № 8.

Будко П. А., Виноградeнко А. М., Литвинов А. И. Экспериментальные исследования кинетического метода контроля и диагностики технических средств. № 9.

Войтицкий С. А., Феофилов С. В., Сафронов А. В. Синтез адаптивной системы управления азимутального электропривода РЛС воздушного базирования. № 4.

Денисова Е. В., Насибуллаева Э. Ш., Насибуллаев И. Ш. Исследование динамических процессов в элементах топливной автоматики № 5.

Зенкевич С. Л., Галустян Н. К. Разработка математической модели и синтез алгоритма угловой стабилизации движения квадрокоптера. № 3.

Климина Л. А., Голуб А. П. Регулирование рабочих режимов ветроэнергетической установки с помощью дифференциальной планетарной передачи. № 4.

Кондратенко В. С., Третьякова О. Н., Наумов А. С., Шевченко Г. Ю., Зобов А. К. Аппаратно-программные средства управления лазерным технологическим оборудованием для резки приборных пластин. № 6.

Кулаков С. М., Торопов Д. В. Комплексирование методов математического моделирования химико-технологического процесса в колонне синтеза аммиака. № 10.

Мартынюк В. А., Трудоношин В. А., Федорук В. Г., Федорук Е. В. Решение обратной задачи динамики в механике на примере трипода. № 3.

Мелентьев В. С., Батищев В. И., Евстифеева Т. С., Левина К. Д. Исследование метода измерения параметров емкостных датчиков перемещения. № 9.

Савонин С. А., Абрамов А. Ю., Рябухо В. П. Цифровая голографическая микроинтерферометрия процессов взаимодиффузии в прозрачных средах. № 11.

Тупиков Д. В., Резчиков А. Ф., Иващенко В. А. Подход к прогнозированию значений факторов пожароопасных ситуаций. № 7.

Чикуров Н. Г. Управление движением инструмента на пятикоординатных станках с ЧПУ. № 6.

УПРАВЛЕНИЕ ТРАНСПОРТНЫМИ СИСТЕМАМИ

Беляков С. Л., Боженюк А. В., Кожаров И. А. Адаптация грузопотока в механических транспортных системах на основе опыта его наблюдения. № 8.

Павловский В. Е., Огольцов В. Н., Огольцов Н. С. Микрокомпьютерная система управления нижнего уровня для автомобиля с механической трансмиссией. № 6.

Путов В. В., Путов А. В., Андриевский В. Р. Управление торможением транспортных колес с электромеханическими движителями. № 3.

Чубуков Н. Н. Анализ проблем и перспективы интеллектуализации транспортных сетей. № 8.

ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Евдокименков В. Н., Красильщиков М. Н., Себряков Г. Г. Контроль и интеллектуальная поддержка действий летчика при выполнении типовых полетных режимов на основе индивидуально-адаптированного подхода. № 8.

Матюшев Т. В., Дворников М. В., Кукушкин Ю. А., Богомолов А. В. Управление длительностью десатурации членов экипажа пилотируемых космических объектов с использованием математического моделирования. № 2.

Сергеев С. Ф. Механизмы аутопоэтической самоорганизации и проблемы управления в технобиосфере. № 12.

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Бурьян Ю. А., Сорокин В. Н., Галуза Ю. Ф., Поляков С. Н. Активная виброизоляционная опора с экстремальной системой управления. № 9.

Герман-Галкин С. Г., Загашвили Ю. В. Энергосберегающие стенды для комплексных испытаний электроприводов. № 2.

Лебедев В. А., Гулый М. В. Быстродействующий вентильный электропривод для оборудования механизированной дуговой сварки. № 6.

Лебедев В. А., Плехотко Г. А. Электропривод подачи электродной проволоки в механизированном оборудовании для дуговой сварки с обратной связью по технологическому процессу. № 9.

Насибуллаев И. Ш., Насибуллаева Э. Ш., Денисова Е. В. Влияние различных видов силы трения в системе двух коаксиальных цилиндров. № 10.

Новоселов Б. В. Параметрические и структурные возможности следящих дифференциальных приводов с опорным каналом. № 10.

Раков В. И., Захарова О. В. Исследование вычислительных возможностей повышения быстродействия цифровых регуляторов для приводов технологического оборудования. Часть 1. Сокращение времени исполнения программ. № 4.

Раков В. И., Захарова О. В. Исследование вычислительных возможностей повышения быстродействия цифровых регуляторов для приводов технологического оборудования. Часть 2. Ускорение вычислительных операций. № 5.

Романов А. М., Петровская А. К., Слащёв Б. В. Исследование возможностей адаптации современных сервоприводов переменного тока для управления двигателями постоянного тока. № 12.

Шароватов В. Т., Чернусь П. П. Математическая модель силовой части оболочкового пневмоцилиндра одностороннего действия толкающего типа. № 9.

К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ Е.П. ПОПОВА

Ардашов А. А., Арсеньев В. Н., Горичев Ю. В., Силантьев С. Б. Е. П. Попов в Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. № 11.

Володин Ю. С., Михайлов Б. Б., Ющенко А. С. Поведение автономного мобильного робота в трехмерном мире. № 11.

Зенкевич С. Л., Болотин Е. И. О планировании в мультиагентных системах, использующих методы искусственного интеллекта. № 11.

Зенкевич С. Л., Назарова А. В., Ющенко А. С. Е. П. Попов — основатель научной школы робототехники в МГТУ им. Н. Э. Баумана. № 11.

Минин А. А., Назарова А. В., Рыжова Т. П. Распределение задач в децентрализованной робототехнической системе. № 11.

Михайлов Б. Б., Нгуен А. В. Использование характеристических точек для распознавания 3D-объектов. № 11.

МЕХАТРОНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В БИОМЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

Борисов А. В. Автоматизация проектирования стержневых экзоскелетов. № 10.

Воробьев Е. И., Чижиков В. И., Михеев А. В. Разработка моделей и алгоритмов управления подвижными элементами пневматического протеза кисти руки. № 10.

Головин В. Ф., Павловский В. Е. Новые направления в медицинской и сервисной робототехнике: по материалам международной конференции MESROB-2013. № 10.

Градецкий В. Г., Ермолов И. Л., Князьков М. М., Семёнов Е. А., Суханов А. Н. Кинематическая модель экзоскелета руки человека и определение ошибки позиционирования. № 5.

Лавровский Э. К., Письменная Е. В. Алгоритмы управления экзоскелетоном нижних конечностей в режиме одноопорной фазы ходьбы по ровной и ступенчатой поверхностям. № 1.

Журнал в журнале

"УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"

Александровская Л. Н., Борисов В. Г., Мазур В. Н., Хлгатян С. В., Ардалионова А. Е. Непараметрические методы оценки соответствия требований к безопасности автоматической посадки самолетов нормам летной годности. № 3.

Александровская Л. Н., Борисов В. Г., Мазур В. Н., Хлгатян С. В., Ардалионова А. Е. Параметрические методы оценки соответствия требований к безопасности автоматической посадки самолетов нормам летной годности. № 6.

Артюшенко В. М., Кучеров Б. А. Роль информатизации в повышении оперативности распределения средств управления космическими аппаратами. № 4.

Афонин А. А., Тювин А. В., Сулаков А. С. Аппаратный и алгоритмический способы уменьшения погрешностей инерциальных датчиков гравиинерциальных комплексных систем. № 12.

Буряк Ю. И., Скрынников А. А. Разработка модели классификатора объектов, движущихся в составе группы, на базе использования средств радиочастотной идентификации. № 3.

Девятисильный А. С., Числов К. А. Интегрированная нейросетевая система оценки параметров ориентации подвижной платформы. № 9.

Джашитов В. Э., Панкратов В. М., Голиков А. В. Активное управление температурными полями бесплатформенной инерциальной навигационной системы с волоконно-оптическими датчиками. № 1.

Жаринов И. О., Кирсанова Ю. А., Коновалов П. В., Костишин М. О. Алгоритм формирования и вывода картографических изображений в системах навигации пилотируемых летательных аппаратов. № 8.

Жук А. С. Численно-аналитический метод построения области достижимости движения судна. № 2.

Загоруйко С. Н., Казьмин В. Н., Носков В. П. Навигация БПЛА и 3D-реконструкция внешней среды по данным бортовой СТЗ. № 8.

Зыбин Е. Ю., Косьянчук В. В., Кульчак А. М. Аналитическое решение задачи оптимальной реконфигурации системы управления летательного аппарата при отказе нескольких органов управления. № 7.

Кабанов Д. С. Синтез алгоритма оптимального программно-позиционного управления многорежимным автоматическим подводным аппаратом. № 1.

Кабанов С. А., Кабанов Д. С. Оптимальное управление разворотом самолета по различным критериям. № 5.

Колесниченко С. В. Разработка методологии обоснования требований к точности чувствительных элементов комплексированных систем управления летательных аппаратов. № 10.

Костишин М. О., Шукалов А. В., Парамонов П. П., Жаринов И. О., Жаринов О. О. Алгоритмы автоматизации конфигурирования загрузочных компонентов аэронавигационной информации и геоинформационных данных авионики. № 9.

Кушнерик А. А., Михайлов Д. Н., Сергеенко Н. С., Щербатюк А. Ф., Гой В. А., Туфанов И. Е., Дубровин Ф. С. Морской робототехнический комплекс, включающий автономные необитаемые подводный и водный аппараты. № 3.

Лавров А. О., Петров В. В., Федунов Б. Е. Оперативное конструирование двумерной траектории выхода подвижного объекта в заданную точку с заданным курсом. Часть 1. № 2.

Лавров А. О., Петров В. В., Федунов Б. Е. Оперативное конструирование двумерной траектории выхода объекта в заданную точку с заданным курсом. Часть 2. № 3.

Лавров А. О., Петров В. В., Федунов Б. Е. Оперативное конструирование двумерной траектории выхода подвижного объекта в заданную точку с заданным курсом. Часть 3. № 4.

Лебедев Г. Н., Зо Мин Тайк. Синтез оптимального управления боковым движением воздушных или речных судов при пересечении их маршрутов под произвольным углом. № 5.

Левский М. В. Использование универсальных переменных в задачах оптимального управления ориентацией космических аппаратов. № 1.

Лобусов Е. С., Фомичев А. В. Формирование алгоритмов бесплатформенной инерциальной системы навигации и основных режимов функционирования системы управления малогабаритного космического аппарата. Часть 1. № 12.

Лукасевич В. И., Соколов С. В. Решение задачи инерциальной наземной навигации с использованием информации электронных карт. № 7.

Парамонов П. П., Великанов А. В., Жаринов И. О., Изергин К. М., Костишин М. О. Особенности построения подсистемы позиционирования нашлемной системы авионики на основе оптико-инерциального принципа. № 11.

Петухов Р. А., Евстифеев В. В., Палкин М. В. Комбинированная система управления угловым движением малого космического аппарата. № 4.

Правидло М. Н., Нестеров В. А., Беляев А. Н. Анализ адаптивной замкнутой системы отделения авиационных средств поражения. Часть 1. № 2.

Правидло М. Н., Нестеров В. А., Беляев А. Н. Анализ адаптивной замкнутой системы отделения авиационных средств поражения. Часть 2. № 3.

Распопов В. Я. Гиродины как объекты изучения по направлению высшего профессионального образования "Системы управления движением и навигация". Часть. 1. Применение, кинематика, функционирование. № 12.

Сапунков Я. Г. Оптимальное управление космическим аппаратом с двигателем ограниченной или импульсной тяги и солнечным парусом. № 4.

Сапунков Я. Г., Молоденков А. В. Алгоритм оптимального в смысле комбинированного функционала разворота космического аппарата в классе конических движений. № 7.

Солдаткин В. В. Особенности реализации и характеристики системы воздушных сигналов вертолета на основе неподвижного многофункционального аэрометрического приемника. № 10.

Старовойтов Е. И., Савчук Д. В. Использование геометрических искажений изображения, формируемого КМОП-фотоприемником, для контроля скорости сближения космических аппаратов. № 2.

Фирсов С. Н. Обеспечение функциональной устойчивости системы стабилизации и ориентации малогабаритного автономного летающего изделия. № 5.

Филаретов В. Ф., Коноплин А. Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Часть 1. № 6.

Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А., Щербатюк А. Ф., Мурсалимов Э. Ш., Туфанов И. Е. Новый метод контурного управления движением АНПА. № 8.

Дорожко В. М. Динамическая нагрузка аномальной вейвлет-волны на неподвижное препятствие. № 8.

Чувашева Е. С., Чувашев С. Н. Математическое моделирование возможности обнаружения высокоскоростных летательных аппаратов в полете по инфракрасному излучению. № 5.

Шибанов Г. П. Оптимизация процесса контроля бортовых комплексов оборудования летательных аппаратов. № 6.

Уважаемые авторы!

Сообщаем Вам, что в связи с подготовкой журнала "Мехатроника, автоматизация, управление" к включению в международные наукометрические базы данных редакция скорректировала требования к статьям и к сопровождающим их материалам, направляемым в адрес редакции. Просьба детально ознакомиться с новыми правилами и строго руководствоваться ими.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Материалы статьи должны соответствовать тематике журнала и содержать новые результаты исследований, не опубликованные ранее и не предназначенные к публикации в других печатных или электронных изданиях.

Для опубликования статьи в редакцию журнала направляются следующие материалы:

- рукопись статьи в doc- и pdf-форматах;
- таблицы, иллюстрации и перечень подрисуночных подписей;
- сведения об авторах, содержащие фамилию, имя, отчество, ученые степень и звание, должность, место работы, служебный и домашний адреса, телефоны и E-mail;
- экспертное заключение о возможности публикации статьи в открытой печати;
- англоязычная информация, содержащая данные статьи, необходимые для индексирования журнала в международных наукометрических базах данных.

Если статья высылается почтовой бандеролью, то в нее необходимо вложить диск с электронной версией перечисленных материалов.

Все статьи проходят обязательное рецензирование. Просьба редакции о доработке рукописи не означает, что статья принята к печати, так как она вновь будет рассматриваться рецензентами, а затем редколлегией. Редакция оставляет за собой право не возвращать автору отклоненную статью и не вести дискуссию по мотивам отклонения. Редакция оставляет за собой право при необходимости сокращать статьи, редактировать и отсылать авторам на доработку.

ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ СТАТЬИ

Статья должна быть структурирована, т. е. должна включать *разделы* с названиями, кратко и точно отражающими их содержание, в том числе:

- введение, содержащее обоснование актуальности и краткий обзор проблематики;
- четкую постановку задачи исследования;
- описание метода решения задачи исследования;
- прикладную интерпретацию и иллюстрацию полученных результатов исследования;
- заключение, включающее обобщение и указание области применения полученных результатов, не повторяющее аннотацию и не ограничивающееся простым перечислением того, что сделано в работе.

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ СТАТЬИ

Объем рукописи статьи, предлагаемой к публикации, должен быть не менее 10 и не более 20 страниц машинописного текста, напечатанного на одной стороне белого листа бумаги формата А4 с полями со всех сторон не менее 2 см, с абзацным отступом 1 см, с полуторным межстрочным интервалом, с использованием текстового редактора Microsoft Word (любая версия) с шрифтом Times New Roman размером 14 pt.

В указанный объем статьи входят: текст, приложения, иллюстрации, таблицы, список литературы. В отдельных случаях по решению редколлегии объем статьи может быть увеличен. Страницы рукописи должны быть пронумерованы, начиная с первой.

Материал статьи должен быть изложен в следующей последовательности:

- *шифр УДК* в левом верхнем углу;
- *инициалы и фамилия автора* (полужирным шрифтом по центру), ученое звание, должность, e-mail;
- *название организации* (без сокращений), город (если организаций больше, чем одна, то указываются все организации со сносками после фамилий соответствующих авторов; в случае совпадения места работы авторов нужно указывать его один раз для всей группы авторов);
- *название статьи* (полужирным шрифтом по центру) не более 12 слов;
- *аннотация* (объемом 5—7 строчек), в предельно сжатой форме излагающая суть работы и полученные результаты;
- *ключевые слова* (8—10 слов), несущие в тексте основную смысловую нагрузку;
- *текст статьи* с учетом указанных далее требований к его оформлению;
- *список литературы*, оформленный по ГОСТ Р 7.0.5—2008;
- *англоязычная информация по статье.*

В тексте статьи следует придерживаться общепринятой терминологии, а все используемые специальные термины, обозначения и аббревиатуры должны быть раскрыты и разъяснены.

Формулы должны быть набраны четко с соблюдением различий в написании прописных и строчных букв, а также букв, сходных по начертанию. Индексы и показатели степени следует писать строго ниже или выше строки. В формулах русские и греческие буквы следует набирать прямо, а латинские буквы, обозначающие скалярные переменные, — курсивом. Величины, обозначающие векторы и матрицы, должны

быть выделены полужирным шрифтом и набраны прямо (допускается также набор всех величин, обозначенных латинскими буквами, в том числе матриц и векторов, светлым курсивом); знак транспонирования — буквой "т" строчной прямой; экспонента — буквой "**e**" полужирной прямой. Стандартные математические обозначения (например, max, log, sin и т. д.) должны быть набраны прямо. Номера формул пишутся справа в круглых скобках. Нумерация формул сквозная и дается в порядке их появления, причем нумеруются только формулы, на которые имеются ссылки в тексте.

Список литературы имеет сквозную нумерацию в порядке упоминания в тексте и содержит следующие данные: фамилия и инициалы автора, название работы, название журнала, сборника (если это не монография), город и полное название издательства (для монографии), год издания, том, номер журнала и страницы. Ссылки на литературные источники даются в квадратных скобках. Допускаются ссылки на электронные носители.

Рисунки и таблицы должны быть выполнены качественно (графическая обработка рисунков в редакции не предполагается). В журнале все рисунки воспроизводятся в черно-белом варианте, за исключением цветных рисунков, размещаемых по усмотрению редакции на обложке журнала.

При подготовке рисунков в электронном виде просим соблюдать следующие требования к растровым изображениям:

TIFF (PhotoShop): — полутоновые цветные — 300 dpi, CMYK;
— полутоновые черно-белые — 300 dpi;
— штриховые иллюстрации — 600 dpi.

Толщина линий должна быть не менее 0,15 мм.

Масштаб надписей должен быть соразмерным с самим рисунком.

Рисунки и таблицы дублируются на отдельных листах, подрисуночные подписи даются отдельным списком. Обозначения на рисунках должны строго соответствовать обозначениям, принятым в тексте, и иметь идентичное написание. Надписка на рисунках должна быть достаточно крупной, чтобы сохранять четкость при уменьшении масштаба рисунка. Не допускаются особо мелкие надписки на рисунках, включая обозначения и оцифровку осей на графиках. Цифровые выноски на рисунках должны быть выполнены курсивом; единицы измерения на осях графиков пишутся через запятую и на русском языке.

Англоязычная информация должна включать (согласно требованиям зарубежных аналитических баз данных) следующие данные:

- инициалы и фамилии каждого автора, e-mail, место работы с указанием индекса и города (при совпадении места работы авторов нужно указывать его один раз для всей группы авторов);
- название статьи; аннотация статьи объемом не менее 220 слов, написанная качественным английском языком, отражающая основное содержание статьи с указанием цели, задачи, результатов исследования и кратких выводов;
- ключевые слова, объемом 10-12 слов;
- перевод списка литературы на английский язык.

Редакция не предоставляет авторских экземпляров журнала и может выслать авторам электронный вариант статьи в pdf-формате. Если авторы хотят гарантированно получить журнал со своей статьей, то им необходимо оформить подписку на этот номер.

Публикация в журнале бесплатная.

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Дизайнер *Т. Н. Погорелова.*
Технический редактор *Е. В. Конова.* Корректор *Т. В. Пчелкина.*

Сдано в набор 29.09.2014. Подписано в печать 12.11.2014. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,86. Заказ MH1214. 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**