

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 17

2016

№ 1

Издается с 2000 года

ISSN 1684-6427

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Редакционный совет:

CHYI-YEU LIN, PhD, prof.
GROUMPOS P. P., prof.
JEN-HWA GUO, PhD, prof.
KATALINIC B., PhD, prof.
SUBUDHI 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.
ШЕРБАТЮК 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.
ЮШЕНКО 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.
ЕРМОЛОВ И. Л., д. т. н., доц.
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. н., 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

Козлов О. С., Скворцов Л. М. Решение задач теории автоматического управления в программном комплексе "МВТУ" 3

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Жданов А. А., Романов А. А., Романов А. А., Семенов С. С. Применение метода автономного адаптивного управления для группы робототехнических устройств на примере модели кластера наноспутников 11

Власов С. М., Борисов О. И., Громов В. С., Пыркин А. А., Бобцов А. А. Алгоритмы адаптивного и робастного управления по выходу роботизированным макетом надводного судна. 18

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Гулай А. В., Зайцев В. М. Достоверность передачи транзакций в мехатронных системах: выбор триплетов помехоустойчивого кода 26

Мелентьев В. С., Батищев В. И., Иванов Ю. М. Анализ и совершенствование методов и систем измерения частоты гармонических сигналов 32

АГЕНТНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Майоров И. В. Применение мультиагентной платформы для создания интеллектуальных систем управления ресурсами в реальном времени 37

Ляхин О. И. Особенности реализации интерактивной мультиагентной системы построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов Российского сегмента Международной космической станции 42

УПРАВЛЕНИЕ В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ

Мышляев Ю. И., Тар Яр Мью. Алгоритмы скоростного биградиента с модифицированной эталонной моделью в задаче управления вибрационным гироскопом 47

Зубов Н. Е., Ли М. В., Ли Е. К., Микрин Е. А., Рябченко В. Н. Алгоритм синтеза терминального управления выставкой космического аппарата в инерционную систему координат 57

Кулифеев Ю. Б., Миронова М. М. Оптимизация траектории снижения тяжелого беспилотного летательного аппарата на этапе полной посадки 67

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования

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

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL



MEKHATRONIKA, AVTOMATIZATSIYA, UPRAVLENIE

Published since 2000

ISSN 1684-6427

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Editorial Council:

ALIEV T. A., prof., Azerbaijan, Baku
 ANSHAKOV G. P., Russia, Samara
 BOLOTNIK N. N., Russia, Moscow
 CHENTSOV A. G., Russia, Ekaterinburg
 CHERNOUSKO F. L., Russia, Moscow
 CHYI-YEU LIN, PhD, Prof., Taiwan, Taipei
 FEDOROV I. B., Russia, Moscow
 GROUMPOS P. P., prof., Greece, Patras
 JEN-HWA GUO, PhD, Prof., Taiwan, Taipei
 KALYAEV I. A., Russia, Taganrog
 KATALINIC B., PhD, Prof., Austria, Vienna
 KRASNEVSKIY L. G., Belarus, Minsk
 KUZNETSOV N. A., Russia, Moscow
 LEONOV G. A., Russia, S.-Peterburg
 MATVEENKO A. M., Russia, Moscow
 MIKRIN E. A., Russia, Moscow
 PESHEKHONOV V. G., Russia, S.-Peterburg
 REZCHIKOV A. F., Russia, Saratov
 SCHERBATYUK A. F., Russia, Vladivostok
 SEBRYAKOV G. G., Russia, Moscow
 SIGOV A. S., Russia, Moscow
 SOJFER V. A., Russia, Samara
 SOLOMENTSEV Yu. M., Russia, Moscow
 SOLOVJEV V. A., Russia, Moscow
 SUBUDHI B., PhD, Prof., India, Sundargarh
 VASILYEV S.N., Russia, Moscow
 YUSUPOV R. M., Russia, S.-Peterburg

Editor-in-Chief:

FILIMONOV N. B., Russia, Moscow

Deputy Editor-in-Chief:

PODURAEV Yu. V., Russia, Moscow
 PUTOV V. V., Russia, S.-Peterburg
 YUSCHENKO A. S., Russia, Moscow

Responsible Secretary:

BEZMEENOVA M. Yu., Russia, Moscow

Editorial Board:

ALEXANDROV V. V., Russia, Moscow
 ANTONOV B. I., Russia, Moscow
 ARSHANSKY M. M., Russia, Tver
 BUKOV V. N., Russia, Zhukovsky
 ERMOLOV I. L., Russia, Moscow
 FILARETOV V. F., Russia, Vladivostok
 FRADKOV A. L., Russia, S.-Peterburg
 FURSOV V. A., Russia, Samara
 GRADETSKY V. G., Russia, Moscow
 ILYASOV B. G., Russia, Ufa
 IVCHENKO V. D., Russia, Moscow
 KOLOSOV O. S., Russia, Moscow
 KOROSTELEV V. F., Russia, Vladimir
 LEBEDEV G. N., Russia, Moscow
 LOKHIN V. M., Russia, Moscow
 PAVLOVSKY V. E., Russia, Moscow
 PROKHOROV N. L., Russia, Moscow
 PSHIKHOPOV V. Kh., Russia, S.-Peterburg
 RAPOPORT E. Ya., Russia, Samara
 SERGEEV S. F., Russia, S.-Peterburg
 VITTIKH V. A., Russia, Samara
 YUREVICH E. I., Russia, S.-Peterburg

Editorial Staff:

GRIGORIN-RYABOVA E.V., Russia, Moscow

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

CONTENTS

METHODS OF THE THEORY OF AUTOMATIC CONTROL

Kozlov O. S., Skvortsov L. M. Solution of Control Theory Problems in the Software Package "MVTU" 3

ROBOTIC SYSTEMS

Zhdanov A. A., Romanov A. A., Romanov A. A., Semenov S. S. Method of Autonomous Adaptive Control Application for Group of Robots on Example of Nano-Satellite Cluster Model. 11

Vlasov S. M., Borisov O. I., Gromov V. S., Pyrkin A. A., Bobtsov A. A. Algorithms of Adaptive and Robust Output Control for a Robotic Prototype of a Surface Vessel. 18

INFORMATION-MEASURING ELEMENT

Gulay A. V., Zaitsev V. M. Transmission Reliability of Transactions in Mechatronic Systems: Choice of Triplets for Noiseproof Code 26

Melentiev V. S., Batishchev V. I., Ivanov Yu. M. Analysis and Improvement of the Methods and Systems for Measurement of the Frequencies of the Harmonic Signals 32

AGENT SYSTEMS CONTROL AND DECISION MAKING

Mayorov I. V. Application of the Multi-Agent Platform for Development of Smart Resource Management Systems in Real-Time 37

Lakhin O. I. Implementation of Multi-Agent System for Scheduling of Flight Program, Cargo Flow and Resources of International Space Station 42

CONTROL IN AEROSPACE SYSTEMS

Myshlyayev Yu. I., Tar Yar Myo. Speed Bigradient Algorithms with a Modified Reference Model in the Control Problem of a Vibratory Gyroscope 47

Zubov N. E., Li M. V., Li E. K., Mikrin E. A., Ryabchenko V. N. Terminal Inertial Attitude Control for a Spacecraft 57

Kulifeev Yu. B., Mironova M. M. Trajectory Optimization of a Heavy Unmanned Aerial Vehicle at the Stage of Full Landing. 67

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

О. С. Козлов, канд. техн. наук, доц., os.kozlov@gmail.com,
Л. М. Скворцов, канд. техн. наук, зав. лаб., lm_skvo@rambler.ru,
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Решение задач теории автоматического управления в программном комплексе "МВТУ"

В статье рассмотрены основные возможности программного комплекса "МВТУ" по решению задач анализа, синтеза, моделирования и параметрической оптимизации систем автоматического управления. Приведены примеры решения таких задач.

Ключевые слова: программный комплекс, системы автоматического управления, моделирование, оптимизация, анализ, синтез

Введение

Среди программных продуктов, используемых для исследования и проектирования систем автоматического управления (САУ) наиболее известны система MATLAB и входящие в ее состав пакеты Simulink, Control System, Robust Control и др. [1, 2], а также отечественные продукты ГАММА [3] и "МВТУ" [4–6]. В статье рассмотрен программный комплекс "Моделирование в технических устройствах" (ПК "МВТУ"), который по своим возможностям является альтернативой пакету имитационного моделирования Simulink. Как и в пакете Simulink, в ПК "МВТУ" принято представление математических моделей в виде структурных схем, блоки которых описываются дифференциальными и разностными уравнениями, непрерывными и дискретными передаточными функциями, алгебраическими соотношениями и логическими условиями. Обширная библиотека типовых блоков, встроенный язык программирования и удобный графический интерфейс обеспечивают построение и наглядное представление на экране компьютера самых разнообразных моделей.

ПК "МВТУ" реализует несколько режимов работы. Режим *Моделирование* обеспечивает имитационное моделирование непрерывных, дискретных и гибридных систем, в том числе и в реальном времени при наличии обмена данными с внешними программами и устройствами. Для оперативного управления процессом моделирования можно создать *Панель управления* с расположенными на ней виртуальными аналогами переключателей, ручных регуляторов, лампочек и измерительных приборов. Режим *Оптимизация* позволяет находить оптимальные параметры проектируемой системы. Режимы *Анализ* и *Синтез* обеспечивают решение задач исследования и проектирования САУ с использованием частотных и корневых методов.

ПК "МВТУ" успешно применяется при проектировании систем управления, следящих приводов и

роботов-манипуляторов, ядерных и тепловых энергетических установок. Данный ПК широко используется в учебном процессе, позволяя моделировать различные природные явления и технические объекты. Учебная версия ПК "МВТУ" вместе с необходимой документацией доступна в сети Интернет [3] и позволяет решать не только учебные, но и многие прикладные задачи. Рассмотрим основные возможности ПК "МВТУ" применительно к задачам исследования и проектирования САУ.

1. Построение модели

Библиотека типовых блоков ПК "МВТУ" разделена на следующие каталоги: *Источники, Данные, Операции математические, Векторные операции, Субструктуры, Динамические звенья, Нелинейные звенья, Логические звенья, Функции математические, Ключи, Дискретные звенья, Статистика, Внешние блоки, Анимация, Контроль и управление, Теплопроводность, Реакторные блоки, Кинетика нейтронов, Гидроавтоматика, Электромашин, Роботы.*

Модель формируется в виде структурной схемы, состоящей из типовых блоков, соединенных линиями связи (в том числе и векторными). Построение модели осуществляется с помощью графического редактора, позволяющего формировать многоуровневые структурные схемы. Подструктуры следующего уровня представлены в виде макроблоков, каждый из которых имеет внутреннюю структуру. В виде макроблоков сформированы, например, модели приводных устройств и элементов электрических схем [7].

Достоинством ПК "МВТУ" является наличие встроенного языка программирования, который можно использовать для формирования математических моделей и реализации алгоритмов их исследования. Диалоговое окно блока "Язык программирования" — это окно текстового редактора, в котором пользователь записывает математическую

модель в виде последовательности операторов. Язык программирования позволяет задавать алгебраические соотношения и дифференциальные уравнения, а также выполнять операции с действительными и комплексными матрицами и векторами, логическими переменными, геометрическими точками, полиномами. Среди конструкций языка — условные и безусловные переходы, циклы, пользовательские функции и процедуры. В пакете Simulink аналогичные возможности заложены в блоке "Embedded MATLAB Function", позволяющем создавать модели с помощью языка системы MATLAB. Но по сравнению с блоком "Язык программирования" ПК "МВТУ" этот блок имеет менее удобный интерфейс и низкую скорость счета.

Рассмотрим построение модели, описываемой передаточной функцией вида $W(s) = B(s)/A(s)$. Такая модель реализована в одном из типовых блоков, но ее можно реализовать и с помощью блока "Язык программирования". Применим один из способов формирования уравнений состояния [8], тогда программа этого блока, снабженная комментариями, запишется в следующем виде:

```
input u; //вход блока
const B = [30, 8], A = [30, 8, 1, 0, 05], m = cols(B) - 1, n = cols(A) - 1;
// B, A — коэффициенты числителя и знаменателя в порядке
// возрастания степеней s; m, n — степени полиномов B(s), A(s)
init x = n#0; //начальные условия
if m < n then y = x [n]/A [n + 1] else y = (x[n] + B[n + 1] * u) / A [n + 1];
x[1] = -A[1]*y; for (i = 2, n) x[i] = x[i - 1] - A[i]*y;
for (i = 1, min(m + 1, n)) x' [i] = x' [i] + B[i]*u;
output y; //выход блока
```

Параметры модели подразделяются на локальные параметры типовых блоков и глобальные параметры макроблоков либо всей модели. Локальные параметры задаются в диалоговом окне типового блока. Глобальные (именованные) параметры задаются в специальном окне макроблока и могут быть использованы во всех внутренних структурах этого макроблока. Любой параметр можно задать в виде выражения, содержащего имена уже определенных параметров, а при задании глобальных параметров можно использовать все средства языка программирования. Это удобно при создании сложных моделей, в которых параметры блоков зависят от некоторых общих для макроблока или всей модели параметров. Отметим, что в пакете Simulink нет аналогичных удобных средств для задания параметров.

При построении модели и решении некоторых задач используются глобальные переменные, задаваемые с помощью типового блока "В память". Параметром этого блока является имя, присваиваемое входной переменной. Типовой блок "Из памяти" позволяет выбрать одну из глобальных переменных, которая будет выходной переменной блока. С помощью этих блоков можно проводить невидимые линии связи между любыми уровнями структурной схемы. Глобальные переменные применяются для задания показателей качества при оптимизации,

а также для обозначения входов и выходов при расчете частотных характеристик и передаточных функций.

Для отображения результатов моделирования используются типовые блоки "Временной график", "Фазовый портрет", "График Y от X". Последний из них отображает зависимость, представленную в каждый момент модельного времени массивами X и Y. Графические окна, связанные с этими блоками, имеют средства для автоматического масштабирования, нахождения координат любой точки, оформления графиков. Дополнительные возможности предоставляет анимационная система ПК "МВТУ", позволяющая создавать виртуальные измерительные приборы и движущиеся объекты.

2. Моделирование

Когда модель построена, можно выполнить ее моделирование. Предварительно следует задать параметры моделирования: метод и интервал интегрирования, максимальный и минимальный шаг, точность решения и т. д. Дополнительно можно установить режим масштабирования времени с заданием множителя ускорения k . Тогда каждая секунда реального времени будет соответствовать k секундам модельного времени. Этот режим удобен при моделировании примеров с анимацией, а при моделировании в реальном времени он позволяет обеспечить синхронизацию обмена данными с внешними устройствами. В пакете Simulink такого режима нет, поэтому расчет примеров с анимацией на быстродействующих компьютерах выполняется очень быстро, и для его замедления приходится специально подбирать малый шаг интегрирования.

Для решения дифференциально-алгебраических уравнений (ДАУ), описывающих динамику модели, в ПК "МВТУ" реализованы 10 явных и 6 неявных методов, информация о которых (а также о параметрах моделирования) содержится в работе [9]. Среди них — явные адаптивные методы, способные эффективно решать жесткие системы уравнений (обычно для решения таких систем применяют неявные методы [10]). В работе [9] показано, что при решении некоторых типов жестких систем явные адаптивные методы могут быть более эффективными и надежными, чем неявные методы.

При использовании явных методов алгебраические уравнения решаются независимо от дифференциальных, т. е. применяется метод пространства состояний [10]. В этом случае решение алгебраических уравнений выполняется одним из трех методов (простых итераций, Ньютона—Рафсона, Бройдена). Такой способ позволяет решать только системы ДАУ индекса 1 (определение индекса ДАУ см. в работе [10]). При использовании неявных методов алгебраические и дифференциальные уравнения решаются совместно, т. е. применяется метод ϵ -вложения [10]. Такой подход позволяет решать системы ДАУ высших индексов (выше первого), что

выгодно отличает ПК "МВТУ" от многих аналогичных систем моделирования. Отметим, что ДАУ высших индексов часто возникают при моделировании электротехнических и механических систем, а также при решении задач оптимального управления.

Удобным средством просмотра результатов в процессе моделирования является "горячая линия", которая инициализируется после двукратного щелчка левой клавишей мыши по линии связи. В результате появляется окно с текущими значениями сигналов в этой линии. Это позволяет посмотреть значение любой переменной в любой момент модельного времени, что упрощает отладку сложных моделей (в пакете Simulink подобное средство отсутствует). Средства диагностики обеспечивают выдачу сообщений об ошибках с указанием блока, где произошла ошибка.

3. Оптимизация

Для решения задачи оптимизации нужно задать оптимизируемые параметры и сформировать критерии качества. Оптимизируемые параметры задаем как глобальные параметры модели. Критерии качества вычисляются в процессе моделирования. Их следует сформировать с помощью типовых блоков и задать как глобальные переменные. Так можно сформировать практически любой критерий. В окне параметров оптимизации задаем ограничения снизу и сверху на оптимизируемые параметры и критерии качества. Оптимизация сводится к нахождению значений оптимизируемых параметров, при которых удовлетворяются все ограничения. Для решения этой задачи программа на основе частных критериев формирует общий критерий, который минимизируется с помощью поисковых алгоритмов. Условием окончания оптимизации является выполнение всех ограничений либо достижение заданной точности. Если на критерий наложить заведомо невыполнимые ограничения (например, если ограничение сверху меньше минимально возможного значения критерия), то он будет минимизирован либо максимизирован. В процессе оптимизации можно наблюдать, как изменяются переходные процессы, оптимизируемые параметры и критерии качества. Примеры решения задачи оптимизации САУ рассмотрены в работах [4, 5].

Аналогичным средством оптимизации в Simulink является пакет Nonlinear Control Design. Отличие от ПК "МВТУ" состоит в том, что в Simulink для формирования критериев качества используется ограниченный набор блоков, позволяющий формировать критерии только определенного вида.

4. Анализ и синтез САУ

В этих режимах программа выполняет линеаризацию САУ в окрестности текущей точки на траектории решения и последующий расчет частотных характеристик, коэффициентов, полюсов и нулей

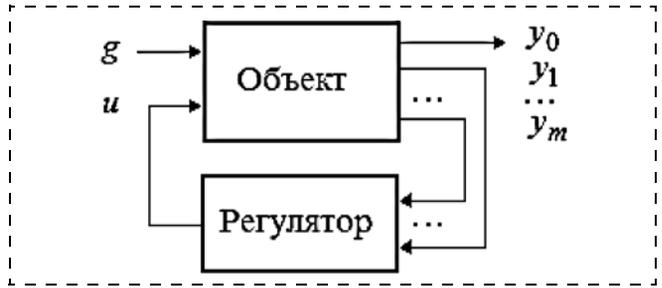


Рис. 1. Структура одномерной САУ

передаточных функций, параметров регулятора. Используются методы и алгоритмы, изложенные в работах [8, 11,12].

Расчет частотных характеристик выполняем путем подстановки $s = j\omega$, $z = e^{j\omega T}$ и решения полученной системы линейных алгебраических уравнений. Могут быть рассчитаны и построены частотные характеристики (вещественная, мнимая, амплитудная, фазовая), годографы Найквиста, Попова, Михайлова, кривая D-разбиения на плоскости одного комплексного параметра. Некоторые алгоритмы реализованы также в виде пользовательских процедур на языке программирования ПК "МВТУ".

Многие современные методы синтеза регуляторов реализованы в системе MATLAB, но не получили широкого практического применения [13]. Это объясняется рядом причин, среди которых — высокий порядок полученного регулятора и отсутствие простой связи между минимизируемым функционалом и применяемыми на практике показателями качества. Поэтому в ПК "МВТУ" реализованы частотный и корневой методы синтеза, основанные на традиционном подходе и позволяющие непосредственно по заданным техническим требованиям конструировать регуляторы низкого порядка.

В общем случае структура одномерной САУ имеет вид, показанный на рис. 1, где g — входное воздействие, y_0 — выходная (управляемая) переменная, y_1, \dots, y_m — наблюдаемые переменные, u — сигнал управления. Реализованные в ПК "МВТУ" методы синтеза предполагают задание регулятора в виде векторной передаточной функции

$$\mathbf{K}(s) = [N_1(s), \dots, N_m(s)]/D(s). \quad (1)$$

Уравнения состояния такого регулятора имеют порядок, равный степени полинома $D(s)$ [8]. В частном случае при $m = 1$, $y_1 = g - y_0$ получаем управление по выходу, а если y_1, \dots, y_m — переменные состояния объекта и $\mathbf{K} = [k_1, \dots, k_m]$, то получаем управление по состоянию. Предварительно можно задать некоторые из коэффициентов полиномов в соотношении (1) (например, из условий обеспечения заданных порядка астатизма и добротности), а остальные коэффициенты рассчитывает программа.

Частотный метод. Пользователь формирует две модели, одна из которых — модель синтезируемой

системы с передаточной функцией $W(s)$, а вторая (эталонная) имеет желаемую передаточную функцию $\tilde{W}(s)$. Формирование желаемой передаточной функции по заданным требованиям является нетривиальной задачей, поэтому в ПК "МВТУ" создан каталог эталонных моделей. Необходимо только выбрать нужную модель и задать ее параметры (обычно это значения добротности и запаса устойчивости по фазе, может быть также и первая сопрягающая частота). Расчет параметров регулятора выполняется интерполяционным методом [11], исходя из условий

$$W(j\omega_i) = \tilde{W}(j\omega_i), i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

которые представляют собой линейные алгебраические уравнения с комплексными коэффициентами относительно искомым параметров. Уравнения (2) приводятся к системе из $2n$ уравнений с действительными коэффициентами. Пусть p — число неизвестных параметров регулятора, тогда из условия равенства числа уравнений и числа неизвестных получим при четном p число узловых частот $n = p/2$. При нечетном p для узловой частоты ω_1 , формируется одно уравнение из условия минимизации величины $|W(j\omega_1) - \tilde{W}(j\omega_1)|^2$, тогда число узловых частот $n = (p + 1)/2$.

Пример модели, подготовленной для синтеза частотным методом в ПК "МВТУ", приведен на рис. 2. На этом и последующих рисунках модель показана в том виде, котором она отображается на экране компьютера. Объект и эталонная система представлены в виде макроблоков, имеющих внутреннюю структуру. Регулятор представлен передаточной функцией, коэффициенты которой задаются в окне глобальных параметров. Блоки "В память" отображены как имена глобальных переменных (g, e, u, y, z) и обозначают вход и выход синтезируемой и эталонной систем, а также вход и выход регулятора. В окне параметров частотного метода следует задать: тип регулятора (непрерывный или дискретный), период квантования (для дискретного регулятора), узловые частоты, вход и выход эталонной системы (g, z), вход и выход синтезируемой системы (g, y), выход и входы регулятора (u, e), имена и размерности знаменателя и числителя передаточной функции регулятора. В общем случае регулятор может иметь несколько входов.

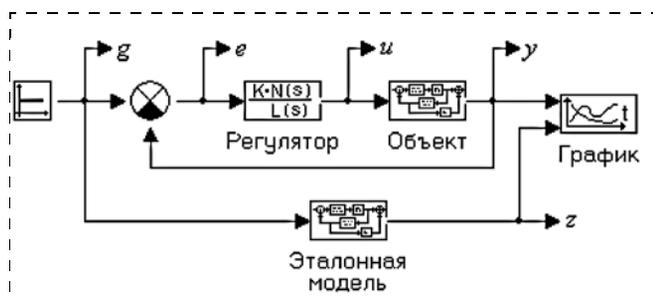


Рис. 2. Модель, подготовленная для синтеза частотным методом

Корневой метод. В окне параметров корневого метода следует задать: желаемое расположение доминирующих полюсов замкнутой системы, выход и входы регулятора, имена и размерности знаменателя и числителей передаточной функции регулятора. Число неизвестных параметров должно совпадать с числом задаваемых полюсов. В частном случае можно задать все полюсы, используя все переменные состояния объекта для формирования сигнала управления, что соответствует задаче модального управления в стандартной постановке. Нахождение неизвестных параметров регулятора сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений [12].

5. Примеры решения задач

Пример 1. Передаточная функция разомкнутой системы имеет вид $W(s) = 4e^{-Ts}/(9 + s^2)$. Требуется найти значения T , при которых замкнутая система устойчива. Задача имеет аналитическое решение $\pi/\sqrt{5} < T < 2\pi/\sqrt{13}$, но в общем случае такое решение может отсутствовать. Для решения задачи удобно воспользоваться критерием Найквиста. Функция $W(s)$ не имеет полюсов в левой полуплоскости и имеет два полюса на мнимой оси. В этом случае кривая годографа $W(j\omega)$ не должна охватывать точку $-1 + j0$ при изменении ω от 0 до $+\infty$, причем кривая имеет разрыв при $\omega = 3$, который следует дополнить дугой большого радиуса, направленной по часовой стрелке (поскольку фаза монотонно убывает). Для расчета годографа можно использовать режим *Анализ*. Но нам интересно посмотреть изменение годографа при непрерывном изменении T , для чего воспользуемся блоком "Язык программирования" для записи программы:

```
function W(s)
    T = time; //time — модельное время
    W = 4*exp(-T*s)/(9 + s^2);
end;
A = 0; fi = 0;
for (i = 1, N)
    begin
        freq = f1*(fn/f1) ^ ((i - 1)/(N - 1));
        c = W(1j*freq); Re[i] = real(c); Im[i] = imag(c);
        fi0 = fi; fi = arg(c); a = abs(c);
        if (fi0 < 0) and (fi > 0) then A = max(a, A);
    end;
output Re[N], Im[N], A;
```

Число точек характеристики N , а также начальную $f1$ и конечную fn частоты задаем в окне глобальных параметров. Выходами являются массивы Re, Im точек годографа (они подаются на входы блока "График Y от X"), а также значение A максимальной амплитуды годографа при пересечении отрицательной полуоси. В процессе моделирования можно наблюдать, как изменяется годограф при изменении T (если расчет выполняется слишком быстро, то следует установить режим масштабирования времени). Границы интервала устойчивости находим как моменты пересечения переменной A единичного значения, для чего используем

блок "Уточнение пересечения". На рис. 3 приведены годографы Найквиста на границах и внутри полуоткрытого интервала устойчивости $1,405 < T < 1,743$.

Пример 2. Объект задан уравнениями

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= u - x_2 + (u - x_2)^3; \\ \dot{x}_2 &= x_1 + 0,2(u - x_2); \\ x_1(0) &= x_2(0) = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Нужно найти программное управление $u(t)$, которое обеспечивает переход выходной переменной x_2 от 0 к 1 за минимальное время при ограничениях $|\dot{x}_2| \leq 0,5$, $|\ddot{x}_2| \leq 0,5$. Искомое управление удовлетворяет условию

$$x_2(t) = y(t) = \begin{cases} 0,25t^2, & t < 1; \\ 0,5t - 0,25, & 1 \leq t < 2; \\ 1 - (0,5t - 1,5)^2, & 2 \leq t < 3; \\ 1, & t \geq 3. \end{cases} \quad (4)$$

Соотношения (3) и (4) представляют собой систему ДАУ, состоящую из дифференциальных уравнений (3) и алгебраического уравнения (4). Реализация этих уравнений в ПК "МВТУ" с использованием блоков "Язык программирования" имеет вид, показанный на рис. 4. Модель содержит блок " $F(Y) = 0$ ", выходная переменная которого находится из условия равенства нулю входного сигнала. Особенностью полученной системы является то, что при известных x_1 и x_2 уравнение (4) не может быть решено относительно u . Это означает, что индекс системы ДАУ больше 1 (в данном случае он равен двум). Используя один из неявных методов ПК "МВТУ", получим решение, приведенное на рис. 5. Такую же модель можно построить в пакете Simulink, но решение не будет получено, поскольку в среде MATLAB + Simulink принципиально невозможно решать ДАУ высших индексов.

Пример 3. В системе, модель которой приведена на рис. 2, объект задан передаточной функцией

$$G(s) = 1/(s + 1)^3. \quad (5)$$

Требуется найти регулятор минимального порядка, обеспечивающий 1-й порядок астатизма, добротность по скорости $K_v = 2$ и запас устойчивости по фазе $\Delta\varphi = 45^\circ$. Воспользуемся частотным методом синтеза и выберем желаемую передаточную функцию разомкнутой системы в виде

$$\tilde{W}(s) = \frac{K}{s(1 + Ts)} \quad (6)$$

(аппроксимация осуществляется в области низких и средних частот, поэтому выбрана передаточная функция низкого порядка). Постоянная времени T и частота среза ω_c выражаются через задаваемые значения добротности по скорости K и запаса устойчивости по фазе $\Delta\varphi$ в виде

$$\omega_c = K/\sqrt{1 + \text{ctg}^2 \Delta\varphi}, \quad T = \text{ctg} \Delta\varphi / \omega_c. \quad (7)$$

Попытка использовать ПИ регулятор $K_I/s + K_P$ не позволила обеспечить заданные требования, по-

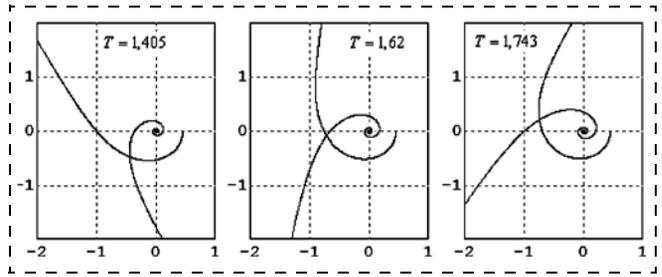


Рис. 3. Годографы Найквиста к примеру 1

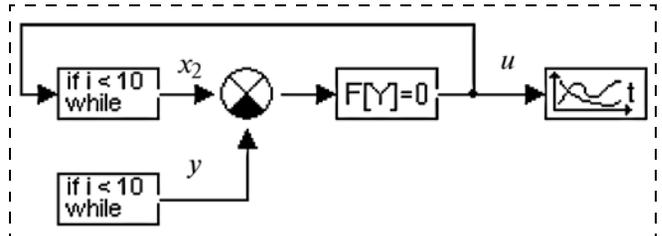


Рис. 4. Реализация системы ДАУ (3), (4) в ПК "МВТУ"

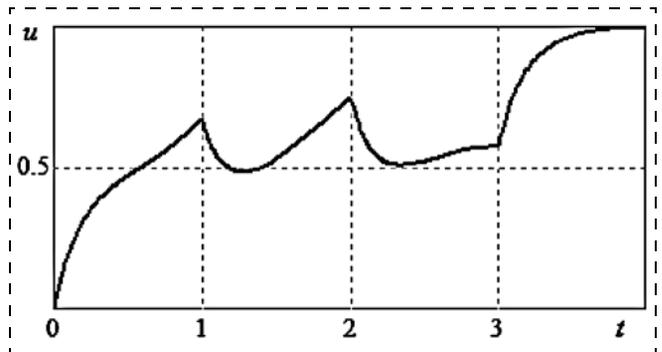


Рис. 5. Программное управление к примеру 2

этому был применен физически реализуемый ПИД регулятор $(K_I + K_P s + K_D s^2)/(s(1 + \tau s))$. В качестве узловых частот задавали ω_c для ПИ и $\omega_1 = 0,01$, $\omega_2 = \omega_c$ для ПИД регулятора. Если в результате расчета значение τ оказывалось отрицательным или очень малым, то выполняли синтез с заданным значением $\tau = 0,1/\omega_c$. Результаты синтеза при различных значениях K в соотношении (6) приведены в табл. 1, где η — степень устойчивости. Жирным шрифтом выделено решение, удовлетворяющее заданным требованиям. По заданным требованиям был также рассчитан дискретный регулятор с периодом квантования 0,05 с и передаточной функцией $[55,9 - 116,14z + 60,34z^2]/(z^2 - z)$.

Таблица 1

Результаты решения примера 3

Регулятор	K	$K_I = K_v$	K_P	K_D	τ	η
ПИ	0,5	0,4104	0,2768	—	—	0,1889
	0,92	0,6471	1,3760	—	—	0,2865
	1,2	0,4648	2,1882	—	—	0,1682
ПИД	1	1,0000	1,6932	0,9590	0,1414	0,3701
	2	2,0001	4,2820	3,1136	0,0707	0,6456
	3	3,0006	5,4809	6,2045	0,0471	0,3937

Результаты решения примера 4

Регулятор	Полюсы		K_I	K_P	K_D	τ
	Задаваемые	Остальные				
ПИ	$-0,3(1 \pm j)$	$-0,955; -1,445$	0,2484	0,2600	—	—
	$-0,4(1 \pm j)$	$-0,561; -1,639$	0,2944	0,4400	—	—
	$-0,5(1 \pm j)$	$-0,293; -1,707$	0,2500	0,5000	—	—
ПИД	$2\#-0,5(1 \pm j)$	$-2,000$	0,5000	1,2500	1,0000	1,0000
	$2\#-0,7(1 \pm j)$	$-7,600$	0,9864	1,9480	1,2616	0,1351
	$2\#-0,74(1 \pm j)$	$-37,5$	1,2007	2,2772	1,4453	0,0267
	$2\#-0,75(1 \pm j)$	∞	1,2656	2,3750	1,5000	0
	$2\#-0,8(1 \pm j)$	$7,600$	1,6827	2,9853	1,8400	-0,1351

Пример 4. Для объекта (5) оценим возможности ПИ и ПИД регулятора при решении задачи заданного расположения наиболее близких к мнимой оси полюсов. Результаты приведены в табл. 2. Через $2\#$ обозначена кратность пары комплексно-сопряженных полюсов. Заметим, что для ПИ регулятора сумма всех полюсов равна -3 , а для ПИД регулятора эта сумма равна $-3 - 1/\tau$.

6. Исследование адаптивной системы с ПИ регулятором

Рассмотрим адаптивную систему, построенную с помощью интерполяционного метода [14]. Пусть $K_P + K_I/s$ — передаточная функция регулятора, а $G(s)$ и $\tilde{W}(s)$ — передаточные функции объекта и разомкнутой эталонной системы. Настройка параметров регулятора осуществляется на основе условия

$$\left(K_P + \frac{K_I}{j\omega_c} \right) G(j\omega_c) = \tilde{W}(j\omega_c), \quad (8)$$

где частота настройки равна частоте среза эталонной системы ω_c . Из соотношения (8) получаем

$$K_P = \operatorname{Re} \frac{\tilde{W}(j\omega_c)}{G(j\omega_c)}, \quad K_I = \operatorname{Re} \frac{\tilde{W}(j\omega_c)j\omega_c}{G(j\omega_c)}. \quad (9)$$

Таким образом, нахождение параметров регулятора сводится к оцениванию значений передаточных функций в заданной точке на мнимой оси. Схема оценивания на основе взвешенного метода наименьших квадратов была предложена в работе [14].

Модель адаптивной системы с ПИ регулятором, сформированная в ПК "МВТУ", показана на рис. 6, где модели регулятора, объекта и устройства адаптации представляют собой макроблоки, имеющие внутреннюю структуру. Модель устройства адаптации показана на рис. 7. На вход регулятора кроме сигнала ошибки с выхода устройства адаптации поступает векторный сигнал настраиваемых параметров $Z = [K_P, K_I]$. Устройство адаптации содержит в своем составе модель разомкнутой эталонной системы в виде передаточной функции $V(s) = s\tilde{W}(s)$.

Настройка контура адаптации на частоту ω_c осуществляется двумя одинаковыми фильтрами с передаточной функцией $F(s) = s^2/(\omega_c^2 + \beta^2) + 2\beta s + s^2$, где β — скорость адаптации (подходящее значение

$\beta = 0,1\omega_c$). Передаточная функция $H(s) = 1/s$ выбрана из условия $H(j\omega_c) = 1/(j\omega_c)$, что обеспечивает выполнение соотношения (9) для оценки K_P . Оценивание параметров регулятора с помощью экспоненциально взвешенного метода наименьших квадратов выполняется в блоке "Язык программирования" с подписью "МНК" (рис. 7), в котором записаны уравнения

$$\dot{K}_P = \frac{u_1 - K_P y_1}{v} y_1, \quad \dot{K}_I = \frac{u_2 - K_I y_1}{v} y_1, \quad \dot{v} = -\beta v + y_1^2, \\ K_P(0) = K_{P0}, \quad K_I(0) = K_{I0}, \quad v(0) = v_0 > 0.$$

Закон управления реализован в блоке "Регулятор" в виде

$$u(t) = K_P(t)x(t) + \int_0^t K_I(\tau)x(\tau)d\tau, \quad x(t) = e(t) + a\sin(\omega_c t),$$

где a — амплитуда испытательного воздействия. В ряде случаев адаптация успешно осуществляется без испытательного воздействия, т. е. при $a = 0$. Например, в системе могут возникать автоколебания

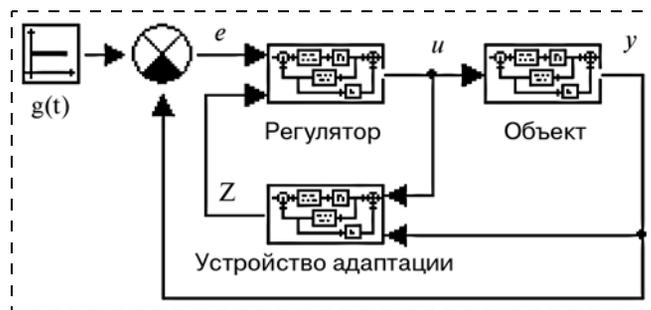


Рис. 6. Модель адаптивной системы

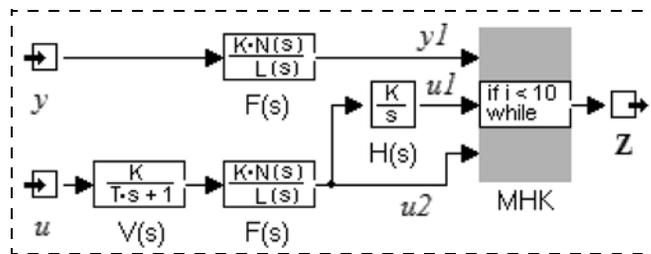


Рис. 7. Модель устройства адаптации

с нужной частотой (такой режим рассмотрен в работе [4]). Приводимый ниже пример также реализован при $a = 0$.

С построенной в ПК "МВТУ" моделью было проведено множество экспериментов при различных моделях объекта, входных воздействиях и параметрах адаптации. Наиболее результативными оказались эксперименты, проведенные в режиме масштабирования времени с использованием виртуального пульта управления, что позволяло оперативно изменять параметры объекта и адаптации в процессе моделирования.

Рассмотрим объект с запаздыванием из работы [15], уравнение которого имеет вид

$$T\dot{y}(t) + y(t) = ku(t - \tau) + f(t - \tau),$$

$$k = 3, T = 5, \tau = 1. \quad (10)$$

Задающее воздействие — ступенчатая функция $g(t) = \{1, t \geq 0; 0, t < 0\}$, а внешнее возмущение $f(t) = 0,05\text{sign}(\sin(2,1t))$. Коэффициент k скачком изменяется в моменты времени $t_1 = 50$ с, $t_2 = 100$ с, принимая значения $k_1 = 10$, $k_2 = 80$. Требуется сформировать управление, при котором после окончания адаптации выполняется условие

$$|e(t)| = |g(t) - y(t)| \leq 0,015. \quad (11)$$

Для объекта (10) выполнение такого условия обеспечивает ПИ регулятор с коэффициентами $K_P = 1,2$, $K_I = 0,37$, при этом установившаяся ошибка не превышает 0,01. Такая система имеет частоту среза $\omega_c = 0,75$ и запас по фазе $\Delta\varphi = 40^\circ$. Эти значения были заданы в качестве параметров эталонной модели (6), (7). Начальные условия примем в виде $K_{P0} = 1$, $K_{I0} = 2$, $v_0 = 10^{-5}$. По сравнению с работой [15] был выбран более жесткий режим работы регулятора, при котором система неустойчива в начальный момент и теряет устойчивость при $t = t_1$ и $t = t_2$.

В рассмотренном примере корректировка параметров регулятора осуществляется только при нарушении условия (11), а при выполнении этого условия параметры регулятора фиксируются. График изменения ошибки приведен на рис. 8. Моделирование адаптивной системы в различных режимах изменения параметра k показало, что период адаптации после изменения k , как правило, не превышает 100 с, а после окончания этого периода ошибка не превышает 0,011. Эти показатели сохраняются даже при скачкообразном изменении k на несколько порядков. Многие другие адаптивные регуляторы

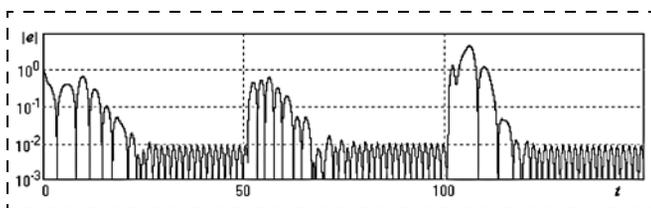


Рис. 8. Абсолютное значение сигнала ошибки в адаптивной системе

не могут быть применены в такой ситуации, поскольку для их успешной работы необходимо, чтобы система сохраняла устойчивость при скачкообразном изменении параметров объекта. Таким образом, исследование адаптивной системы с помощью ПК "МВТУ" подтвердило работоспособность предложенной схемы адаптации.

Заключение

Опыт решения большого числа учебных, научных и прикладных задач показал, что ПК "МВТУ" является удобным и эффективным средством для исследования и проектирования самых разнообразных динамических систем (в том числе и САУ), не уступающим по своим возможностям лучшим зарубежным аналогам. Чтобы убедиться в этом, достаточно попробовать решить рассмотренные здесь примеры с помощью других программных продуктов (например, MATLAB + Simulink).

Список литературы

1. Moore H. MATLAB for Engineers. 4th edition. Prentice Hall, 2014. 670 p.
2. Xue D., Chen Y. Q. Modeling, Analysis and Design of Control Systems with MATLAB and Simulink. Singapore: World Scientific, 2014. 580 p.
3. Александров А. Г., Михайлова Л. С., Степанов М. Ф. Система ГАММА-3 и ее применение // Автоматика и Телемеханика. 2011. № 10. С. 19—27.
4. Сайт разработчиков программного комплекса "МВТУ". URL: <http://mvtu.power.bmstu.ru/> (дата обращения 30.09.2015).
5. Козлов О. С., Кондаков Д. Е., Скворцов Л. М., Тимофеев К., Ходаковский В. В. Программный комплекс "Моделирование в технических устройствах". URL: <http://model.exponenta.ru/mvtu/20050615.html> (дата обращения 30.09.2015).
6. Козлов О. С., Кондаков Д. Е., Скворцов Л. М. и др. Исследование и проектирование систем автоматического управления с помощью программного комплекса "МВТУ" // Пленарные доклады и избранные труды Третьей международной конференции по проблемам управления. М.: Изд-во ИПУ РАН, 2006. С. 853—860.
7. Козлов О. С., Скворцов Л. М. Построение математических моделей электрических цепей в программных комплексах структурного моделирования // Инженерный вестник. 2012. № 7. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/460380.html> (дата обращения 30.09.2015).
8. Крутько П. Д., Максимов А. И., Скворцов Л. М. Алгоритмы и программы проектирования автоматических систем. М.: Радио и связь, 1988. 306 с.
9. Козлов О. С., Скворцов Л. М., Ходаковский В. В. Решение дифференциальных и дифференциально-алгебраических уравнений в программном комплексе "МВТУ". URL: <http://model.exponenta.ru/mvtu/20051121.html> (дата обращения 30.09.2015).
10. Хайрер Э., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи. М.: Мир, 1999. 685 с.
11. Скворцов Л. М., Козлов О. С., Ходаковский В. В. Синтез и самонастройка систем управления в частотной области // Вторая международная конференция по проблемам управления: Избранные труды. М.: Изд-во ИПУ РАН, 2003. Т. 2. С. 265—268.
12. Скворцов Л. М. Интерполяционные методы синтеза систем управления // Проблемы управления и информатики. 1998. № 6. С. 25—30.
13. Киселев О. Н., Поляк Б. Т. Синтез регуляторов низкого порядка по критерию H^∞ и по критерию максимальной робастности // Автоматика и Телемеханика. 1999. № 3. С. 119—130.
14. Скворцов Л. М. Интерполяционный метод автоматической настройки регуляторов // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1998. № 6. С. 100—103.
15. Александров А. Г. Адаптивное управление объектом с запаздыванием // Труды IX Международной Четаевской конференции "Аналитическая механика, устойчивость и управление движением". Иркутск, 2007. Т. 3. С. 6—13.

Solution of Control Theory Problems in the Software Package "MVTU"

O. S. Kozlov, os.kozlov@gmail.com, **L. M. Skvortsov**, lm_skvo@rambler.ru✉,
Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russia

Corresponding author: **Skvortsov Leonid M.**, PhD, Associate Professor, Head of Laboratory,
Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation,
e-mail: lm_skvo@rambler.ru

Received on August 30, 2015

Accepted on September 10, 2015

The software package "MVTU" (Modeling in Technical Devices; in Russian — Modelirovanie V Tehnicheskikh Ustrojstvah) is intended for research and design of the systems described by the differential, algebraic and difference equations. Complex technical object is a controlled object, therefore in the package "MVTU", along with the methods of simulation, the methods of control theory are implemented. In terms of features this package is an alternative of package Simulink, which is a part of system of mathematical computations MA TLAB. As well as in the package Simulink, in the package "MVTU" representation of mathematical model in the form of block diagram is accepted. Blocks of such diagram are described by the differential and difference equations, continuous and discrete transfer functions, algebraic relations and logical conditions. The package "MVTU" implements the following operating modes. The operating mode Simulation provides simulation of continuous, discrete and hybrid systems, including in real time in the presence of data exchange with external programs and devices. The mode Optimization allows us to find optimum parameters of the designed system. The modes Analysis and Synthesis provide the solution of problems of research and design of control systems with use of frequency and root methods. The paper describes the main features of the package "MVTU" according to the solution of problems of the analysis, synthesis, simulation and parametric optimization of automatic control systems. Examples of the solution of such problems are given. Experience of the solution of a large number of educational, scientific and applied problems showed that the package MVTU doesn't concede by the opportunities to the best foreign analogs.

Keywords: software package, automatic control systems, simulation, optimization, analysis, synthesis

For citation:

Kozlov O. S., Skvortsov L. M. Solution of Control Theory Problems in the Software Package "MVTU", *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 3—10.

DOI: 10.17587/mau/17.3-10

References

1. **Moore H.** MATLAB for Engineers, 4th edition, Prentice Hall, 2014, 670 p.
2. **Xue D., Chen Y. Q.** Modeling, Analysis and Design of Control Systems with MATLAB and Simulink, Singapore, World Scientific, 2014, 580 p.
3. **Aleksandrov A. G., Mikhailova L. S., Stepanov M. F.** Sistema GAMMA-3 i ee primenenie (GAMMA-3 system and its application), *Avtomatika i Telemekhanika*, 2011, no. 10, pp. 19—27 (in Russian).
4. **Sajt** razrabotchikov programmnogo kompleksa "MVTU" (Site of developers of the software package "MVTU"), available at: <http://mvtu.power.bmstu.ru/> (in Russian).
5. **Kozlov O. S., Kondakov D. E., Skvortsov L. M., Timofeev K., Khodakovskii V. V.** Programmnij kompleks "Modelirovanie v tehnicheskikh ustrojstvah" (The software package "Modeling in Technical Devices"), available at: <http://model.exponenta.ru/mvtu/20050615.html> (in Russian).
6. **Kozlov O. S., Kondakov D. E., Skvortsov L. M.** i dr. Issledovanie i projektirovanie sistem avtomaticheskogo upravlenija s pomoshh'ju programmnogo kompleksa "MVTU" (Research and design of automatic control systems by means of the software package "MVTU"), *Plenarnye doklady i izbrannye trudy Tret'ej mezhdunarodnoj konferencii po problemam upravlenija*, Moscow, Publishing house of IPU RAN, 2006, pp. 853—860 (in Russian).
7. **Kozlov O. S., Skvortsov L. M.** Postroenie matematicheskikh modelej jelektricheskikh cepej v programmnih kompleksah strukturnogo modelirovanija (Building of mathematical models of electric circuits in the software of structural modeling), *Inzhenernyj Vestnik*, 2012, no. 7, available at: <http://engbul.bmstu.ru/doc/460380.html> (in Russian).
8. **Krut'ko P. D., Maksimov A. I., Skvortsov L. M.** *Algoritmy i programmy projektirovanija avtomaticheskikh sistem* (Algorithms and programs for design of automatic systems), Moscow, Radio i svjaz', 1988, 306 p (in Russian).
9. **Kozlov O. S., Skvortsov L. M., Hodakovskij V. V.** Reshenie differencial'nyh i differencial'no-algebraicheskikh uravnenij v programnom komplekse "MVTU" (Solution of differential and differential-algebraic equations in the software package "MVTU"), available at: <http://model.exponenta.ru/mvtu/20051121.html> (in Russian).
10. **Hairer E., Wanner G.** Solving ordinary differential equations. Stiff and differential-algebraic problems, Berlin, Springer-Verlag, 1996.
11. **Skvortsov L. M., Kozlov O. S., Hodakovskij V. V.** Sintez i samonastrojka sistem upravlenija v chastotoj oblasti (Synthesis and self-tuning of control systems in frequency area), *Vtoraja mezhdunarodnaja konferencija po problemam upravlenija: Izbrannye trudy*, Moscow, Publishing house of IPU RAN, 2003, vol. 2, pp. 265—268 (in Russian).
12. **Skvortsov L. M.** Interpoljacionnye metody sinteza sistem upravlenija (Interpolation methods for synthesis of control systems), *Problemy Upravlenija i Informatiki*, 1998, no. 6, pp. 25—30 (in Russian).
13. **Kiselev O. N., Poliak B. T.** Sintez reguljatorov nizkogo porjadka po kriteriju H^∞ i po kriteriju maksimal'noj robnosti (Synthesis of low-order controllers by the H^∞ and the maximum robustness criteria), *Avtomatika i Telemekhanika*, 1999, no. 3, pp. 119—130 (in Russian).
14. **Skvortsov L. M.** Interpoljacionnyj metod avtomaticheskogo nastrojki reguljatorov (The interpolation method for auto-tuning of controllers), *Izv. RAN. Teorija i Sistemy Upravlenija*, 1998, no. 6, pp. 100—103 (in Russian).
15. **Aleksandrov A. G.** Adaptivnoe upravlenie ob'ektom s zapazdyvaniem (Adaptive control of object with delay), *Trudy IX Mezhdunarodnoj Chetaevskoj konferencii "Analiicheskaja mehanika, ustojchivost' i upravlenie dvizheniem"*, Irkutsk, 2007, vol. 3, pp. 6—13 (in Russian).

А. А. Жданов¹, д-р физ.-мат. наук, проф., гл. науч. сотр., aazhdanov@ipmce.ru,
Алексей А. Романов², д-р техн. наук, проф., зам. генерального директора по науке, romanov48@yandex.ru,
Александр А. Романов², д-р техн. наук, гл. науч. сотр., romulas@mail.ru,
С. С. Семенов¹, аспирант, semenovss@gmail.com,

¹Институт точной механики и вычислительной техники им. С. А. Лебедева РАН, Москва,
²АО "Российские космические системы", Москва

Применение метода автономного адаптивного управления для группы робототехнических устройств на примере модели кластера наноспутников

Представлена идея применения биологически инспирированного метода автономного адаптивного управления [1, 2] для распределенного управления группой объектов на модельном примере из области космонавтики.

Ключевые слова: распределенное управление, управление группой роботов, адаптивное управление, автономное адаптивное управление, группа спутников, наноспутники, зондирование ионосферы

Введение

В последнее время в теории управления все более актуальной становится задача управления группой робототехнических устройств. Разрабатывается направление "интеллект роя". Повышается автономность таких устройств, и строятся распределенные системы управления. Наиболее хорошо зарекомендовали себя подходы, основанные на подробной математической формализации объектов управления (ОУ). Однако их точность ограничена возможностями математики, которые не беспредельны, и часто ситуацию не спасают ни численные методы, ни мощные ЭВМ. Поэтому в последнее время начинают активно развиваться альтернативные подходы, в частности, биологически инспирированные (подсказанные анализом биологических объектов), в которых принцип управления основан не на аналитически выраженных математических моделях ОУ, а на эмпирической информации о процессе управления. Это позволяет дорогостоящее математическое моделирование заменить алгоритмами обучения с учителем или алгоритмами самообучения. При этом подходе может достигаться более высокое качество управления, поскольку система управления автоматически приспосабливается к реальным текущим свойствам ОУ, а ограничения обусловлены возможностями алгоритма самообучения и доступными ресурсами бортового вычислителя.

В данной работе представлены первые результаты исследования возможностей применения для группового управления одного из подобных биологически инспирированных методов, а именно

метода автономного адаптивного управления (ААУ) [1]. В качестве примера группового объекта управления взята актуальная задача из области космонавтики — управление группой наноспутников, осуществляющих сканирование ионосферы Земли.

Задача томографии ионосферы

В начале 2000 г. DARPA объявила конкурс на создание программы университетских наноспутников различного целевого назначения. При этом главная задача состояла в том, чтобы предложить принципиально новый механизм создания в короткие сроки дешевых малоразмерных космических аппаратов (КА) из коммерчески доступных элементов силами студентов и аспирантов. В рамках этой программы был предложен стандарт пико- и наноспутников, названный CubeSat. На базе наноспутников развивается множество проектов, направленных на решение разнообразных геофизических задач — CubeSTAR, Firebird, RAX, QuakeSat, KestrelEye, MISC-1, SMDC и др.

В 2005 г. был запущен первый в России космический аппарат нанокласса ТНС-0, разработанный в ОАО "Российские космические системы", предназначенный для отработки принципиально новой концепции управления КА. В настоящее время на предприятии разработано целое семейство космических платформ нанокласса для решения спектра различных задач: дистанционного зондирования (ТНС-1), геофизического мониторинга ионосферы, автоматической идентификационной системы судов (АИС) ТНС-0 № 2 и др.

Одним из возможных применений кластера малоразмерных КА является задача радиопросвечивания ионосферы для восстановления в реальном масштабе времени распределения электронной концентрации во всей плоскости вращения КА. Известно, что ионосфера является индикатором процессов, происходящих на Земле. Традиционно задача спутникового исследования ионосферы базируется на методах трансionoсферной спутниковой томографии, включающей регистрацию на поверхности Земли прошедшего через ионосферу когерентного излучения 150...400 МГц, источником которого служат навигационные спутниковые системы 1-го поколения [3]. Использование наземных станций создает ряд проблем, однако их можно обойти, перенеся в космос приемную и записывающую аппаратуру, дающую глобальное распределение электронной концентрации ионосферы по орбите КА.

Предварительное численное моделирование, результаты которого приведены в работе [4], показало, что расчет (реконструкция) вертикального распределения электронной концентрации ионосферы при использовании схемы зондирования типа "спутник — спутник" с учетом наличия в исследуемой плоскости 36 КА может быть выполнен без использования любой априорной информации за 15 мин и с точностью не менее 10 %.

Стоимость КА сверхмалого класса существенно ниже затрат на традиционные КА. Тем не менее, необходимо предложить такую конфигурацию орбитальной группировки мониторинга ионосферы, которая при минимальном числе КА обеспечила бы требуемый уровень ошибок реконструкции. В работе [5] показано, что можно существенно сократить число КА при условии формирования кластера с фиксированными позициями КА в нем, а также введения определенных ограничений на исследуемую область в ионосфере Земли.

Для рассматриваемых вариантов необходимо подобрать такое взаимное расположение приемников и передатчиков, при котором будет достигаться наименьшая ошибка реконструкции для рассматриваемого диапазона высот (рис. 1).

Реконструкция ионосферы с использованием начального приближения для кластера из пяти КА с 5 %-ной ошибкой позиционирования (а с учетом наложенных неоднородностей ошибка достигает

10 %) показала среднюю ошибку результата 6 % и максимальную 20 %. Неоднородности хорошо различимы на реконструкции. В случае использования начального приближения с 30 %-ным несоответствием средняя ошибка составила 11 %, максимальная ошибка осталась на прежнем уровне.

Целесообразно использовать четыре или пять малоразмерных КА в качестве базовых элементов кластера космической группировки перспективной системы мониторинга ионосферы. Оптимальные углы расстановки приемных и передающих КА в орбитальной плоскости несколько различаются в зависимости от числа КА в кластере. Для кластера из пяти КА они составили — передающие: 0, 1,5, 2,5; принимающие: 48, 53,5, для четырех КА — передающие: 0, 3,5; принимающие: 45,5, 52,5, соответственно.

Для осуществления данного космического эксперимента необходимо решить, в частности, две проблемы: создать кластер КА на околоземной орбите (т. е. развести спутники в соответствующие точки после запуска одним ракетоносителем), а затем обеспечить постоянство взаиморасположения спутников в кластере, что требует построения системы автоматического группового управления. Несмотря на то, что в настоящий момент не существует еще ни доступных групп наноспутников, ни активных приводов для самих наноспутников, ни эффективных систем связи между наноспутниками, наличие которых необходимо для группового управления, мы взяли этот пример, потому что время появления указанных отсутствующих компонентов быстро приближается, и, тем самым, задача построения системы группового управления, хотя и ориентирована на будущее, но имеет быстро возрастающую актуальность. По указанным причинам значения параметров спутников и их орбит в модели процесса управления взяты условно и не играют здесь существенной роли для объяснения принципа управления.

Адаптивное управление группой наноспутников

В данной работе мы делаем попытку подойти к проблеме управления группой наноспутников не с традиционной, но с новой для данной области точки зрения, а именно — с биологически инспирированной. Можно видеть, как в природе группы живых организмов весьма согласованно взаимодействуют при решении различных общих задач. Их распределенные системы управления представляют собой совокупность индивидуальных управляющих систем (УС), которые научились выполнять свои локальные задачи в группе посредством обучения и самообучения, пользуясь наблюдаемой локальной информацией. Такие природные распределенные системы управления обладают рядом свойств, которые пока мало воспроизводимы в технических системах, а именно: гибкостью, т. е. способностью перестраиваться при изменении условий; способностью к построению иерархичного много-

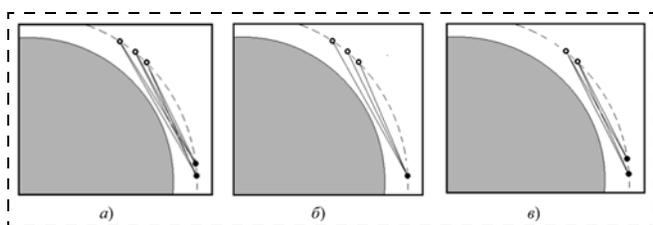


Рис. 1. Принципиальная схема расположения космических аппаратов (КА) на орбите Земли при разном числе КА—приемников и КА—передатчиков в кластере: а — 2:3, б — 1:3, в — 2:2

уровневого управления в группе; взаимозаменяемостью, т. е. возможностью смены ролей в группе при выходе из строя того или иного индивида; универсальностью — способностью решать различные задачи, требующие разных тактик и стратегий, и другими свойствами. Традиционные подходы к построению систем управления требуют возможно более точной математической формализации свойств ОУ и, соответственно, выведенных отсюда законов управления. Часто такого рода формализация крайне затруднена, если свойства ОУ сложны, ОУ гетерогенны или их свойства изменяются со временем. Примененный нами метод ААУ ориентирован именно на такого рода ОУ, так как адаптируется к реальным текущим свойствам ОУ и среды.

Система автономного адаптивного управления

С математической точки зрения все современные системы управления описываются отображением $вход(t) \rightarrow выход(t+1)$, где "вход" — это текущие значения наблюдаемых в момент t параметров, а "выход" — это управляющее воздействие, которое системе управления следует совершить в момент $t+1$. Отображение описывается некоторой функцией, заранее заданной и, возможно, оптимизированной под ожидаемые условия работы УС. В механике такой зависимостью описывается всякое механическое или любое иное звено в механизме. С биологической точки зрения такое отображение соответствует понятию рефлекса: $стимул(t) \rightarrow реакция(t+1)$, где "стимул" — это некоторое воздействие на организм, а "реакция" — это то, как этот организм должен реагировать на стимул, причем слово "должен" требует объяснения. Подразумевается, что в нервных системах, в отличие от механики, механизмом трансформации воздействия являются не механические звенья, а рефлекторная дуга. Формально такая зависимость описывается следующим образом:

$$\{O_i(t)\} \rightarrow \{D_j(t+1)\}, \quad (1)$$

где $\{O_i(t)\}$ — множество распознаваемых системой распознавания состояний ОУ, а $\{D_j(t+1)\}$ — множество предписанных заданным отображением " \rightarrow " управляющих воздействий. Вопрос: кто именно предписал конкретно это отображение, почему и зачем? В природе рефлекс наблюдается только в следующих случаях — это либо некая элементарная, оптимизировавшаяся реакция организма на бесконечно много раз повторявшееся воздействие (отдергивание руки при ожоге), либо это реакция, которую кто-то хочет привить этому организму из каких-либо своих целей (тренировка животного или раба). Со времен Сеченова, сводившего всю интеллектуальную деятельность к совокупности рефлексов вида (1), многие специалисты признали несостоятельность этой формулы для описания интеллектуального управления. Нами для построения интеллектуальных биологически инспирирован-

ных автономных систем управления предлагается (как альтернатива (1)) следующая формула:

$$(\{O_i(t)\} \& D_j(t+1)) \rightarrow \{O_k(t+2)\} \rightarrow \{Z_k(t+3)\}. \quad (2)$$

Здесь $\{O_i(t)\}$ — это множество образов текущего состояния, которые умеет распознавать система распознавания УС. Некоторые из этих образов могут быть распознаны в текущий момент;

$D_j(t+1)$ — это одно из действий (из их доступного УС множества), которое может совершить УС при данных распознанных образах;

$\{O_k(t+2)\}$ — это образы результатов, которые будут получены, если УС выберет и совершит действие $D_j(t+1)$, а уверенность в том, что именно эти результаты будут получены, основана на эмпирическом опыте, либо других знаниях, хранящихся в памяти УС;

$\{Z_k(t+3)\}$ — это совокупность эмоциональных (качественных) оценок, которые будут получены как следствие распознавания образов $\{O_k(t+2)\}$, что также основано на опыте или на других знаниях.

Смысл выражения (2), коротко говоря, состоит в том, что, распознав текущую ситуацию в виде множества образов $\{O_i(t)\}$, УС обращается к своей памяти (базе знаний), находит там список возможных в этой ситуации действий $D_j(t+1)$ и их следствий и выбирает для исполнения то из них, которое приведет к результирующей ситуации $\{O_k(t+2)\}$ с максимальными из возможных здесь эмоциональными оценками $\{Z_k(t+3)\}$. Это действие и выбирается УС для совершения.

Одна запись вида (2) в памяти УС есть *элементарное знание*, а их совокупность составляет *базу знаний* (БЗ). Можно утверждать, что формула (2) описывает не рефлекс, а выражает возможность свободного выбора УС наилучшего для нее действия, зависящего от: а) ее знаний, полученных в предыстории вплоть до последнего момента; б) текущих возможностей системы распознавания и совокупности образов, которые она умеет распознавать; в) имеющегося репертуара действий; г) качества текущего состояния, влияющего на тщательность выбора действия (здесь не описано), и некоторых других факторов. Если формула рефлекса (1) есть формула дрессировки, то (2) есть формула свободного и интеллектуального принятия решений (управления) на основе знаний и в соответствии с законами естественного права на выживание.

Принятие решений по формуле (2) не рефлекторно, не реактивно, а активно — УС всегда ищет способ перевести ОУ в лучшее состояние, а текущие условия лишь ограничивают принятие решений. Поэтому поведение УС, согласно идее ААУ, активно. Более того, УС необходимо также предпринимать активные действия, направленные на поиск новых знаний, так как, чем больше знаний в БЗ, тем больше вероятность выживания и улучшения состояния ОУ.

Из сказанного следует, что УС, использующая метод ААУ (как и любой живой организм), должна

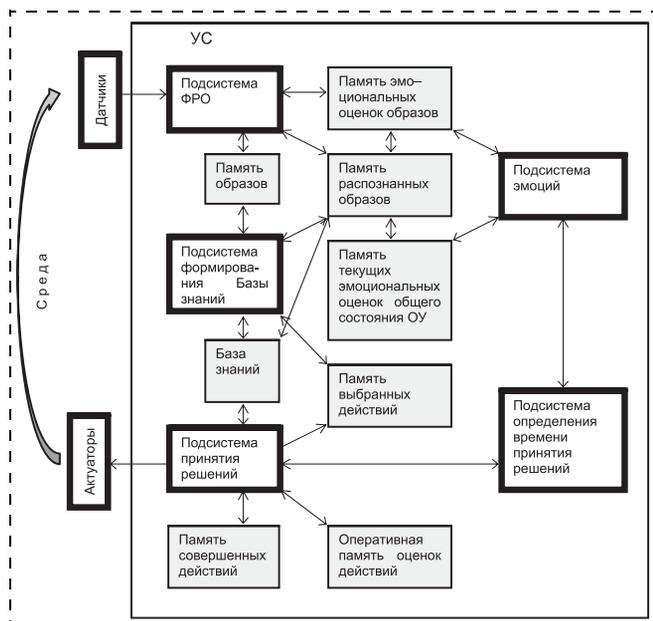


Рис. 2. Схема системы "Автономного адаптивного управления" (ААУ)

иметь две противоречивых целевых функции: 1) *гносеологическую* — направленную на поиск знаний о свойствах мира, и 2) *оптимизационную* — направленную на максимизацию своей текущей общей эмоциональной оценки.

Описанный алгоритм реализуется УС, имеющей структуру, показанную на рис. 2 (подробное описание см., например, в работах [1, 2]).

Подсистема *формирования и распознавания образов* (ФРО) — это самообучаемая система распознавания. Она в фоновом режиме формирует новые образы O_i , сохраняя их описания в *памяти образов*, а в реальном времени распознает образы во входной информации от датчиков. Подсистема *формирования базы знаний* в фоновом режиме отыскивает в предыстории закономерности вида (2) — *элементарные знания* — и сохраняет найденные закономерности в *базе знаний* (БЗ) в определенных информационном структурах.

Подсистема эмоций формирует *эмоциональные оценки* Z_i для сформированных образов O_i и сохраняет их в своей памяти. *Подсистема принятия решений* выбирает действия D_j для совершения на очередном такте. Выбор осуществляется исходя из указанных двух целевых функций, причем выбор оптимального для выживания ОУ решения опирается на имеющиеся в БЗ знания, а для удовлетворения поисковой целевой функции при выборе действия должна использоваться определенная случайная компонента.

Подсистема определения времени принятия решений определяет глубину просмотра БЗ при выборе действия в зависимости от качества текущей ситуации и скорости ее изменения. Остальные блоки в системе ААУ являются блоками памяти для указанных подсистем.

Все подсистемы системы ААУ могут быть самообучаемыми, и их можно реализовать на основе различных методов анализа данных. Если в конкретных прикладных случаях есть возможность, то отдельные подсистемы делаются детерминированными, но в целом система ААУ остается адаптивной, если самообучаемой остается хотя бы одна из ее подсистем.

Наиболее адекватен методу ААУ нейроподобный способ построения системы с помощью специальных самообучаемых моделей нейронов [2]. Надо понимать, что любая самообучаемая система распознавания требует наличия априорной информации — словаря признаков, алфавита классов или правил формирования образов и т. п. При этом самообучение происходит только в пределах, определенных такой априорной информацией. Априорная информация задается либо разработчиком, либо находится путем применения методов поисковой оптимизации. В природе априорная информация находится в процессе длительного эволюционного отбора при формировании биологических видов. Систему ААУ тоже можно строить либо на основе имеющейся у разработчика априорной информации, локализуя поисковое пространство и сводя его к минимуму, либо применять подходящие методы поисковой оптимизации (например, генетические алгоритмы [6]) для определения оптимальных значений многочисленных параметров системы ААУ.

Распределенная адаптивная система управления для группы наноспутников

Задачей системы автоматического управления группой наноспутников является поддержание заданной пространственной конфигурации группы в процессе ее движения по заданной орбите. Для каждого отдельного спутника строим отдельную систему ААУ (рис. 2), реализующую формулу (2). УС на основе ААУ должна научиться поддерживать заданное положение своего спутника относительно спутника, являющегося ведущим для него.

Подсистема ФРО должна отвечать принципу наблюдаемости, т. е. поставлять эффективную для управления наблюдательную информацию. Положение спутника удобнее всего рассматривать в орбитальной системе координат (СК) RNB (рис. 3)

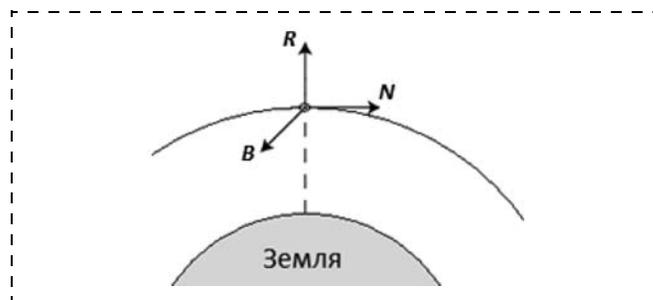


Рис. 3. Орбитальная система координат (RNB)

с осями R (радиальной), N (нормалью) и B (бинормалью). Отклонения по оси B считаем малыми для характерного времени жизни системы и здесь пренебрегаем ими.

Время t в системе дискретно и эквидистантно. Подсистему ФРО строим как геометрическую систему распознавания без обучения. Для априорного описания образов (классов) $O_i(t)$ организуем признаковое пространство по осям R и N с границами $[r(t)_{\min}, r(t)_{\max}]$ и $[n(t)_{\min}, n(t)_{\max}]$, разбиваем его на некоторое множество покрывающих его и пронумерованных индексом i непересекающихся областей. Если спутник в момент t попадает в область i , то говорим, что в момент t распознан образ $O_i(t)$, отмечая это событие как $O_i(t) = 1$. Если образ O_i в момент t не распознан, то пишем $O_i(t) = 0$.

Образы результатов $\{O_k\}$ в общем случае могут быть из того же множества, что и образы исходных состояний $\{O_k\} \subseteq \{O_i\}$, либо быть некоторыми их комбинациями, так как результат обычно бывает менее конкретен, чем исходное состояние. Например, опишем образы результатов O_k также в стиле геометрических систем распознавания как семь расширяющихся прямоугольных концентрических кластеров с общим центром, соответствующим целевой точке в пространстве (R, N) . Каждому образу результата присваивается качественная оценка от 1 до 7 в порядке улучшения качества результирующего состояния, максимальная оценка 7 присваивается целевому состоянию ОУ.

Аппарат эмоций (АЭ) является важнейшей подсистемой в системе ААУ. Его функции: 1) определять качественные (эмоциональные) оценки Z_i для всех сформированных образов O_i и сохранять их в своей памяти как атрибуты образов. Эти оценки могут быть заданы априори либо находиться автоматически методами корреляционного (или т. п.) анализа; 2) оценивать суммарную эмоциональную оценку $S(t)$ текущего состояния ОУ и ее производную; 3) задавать непосредственную цель принятия решений — добиваться максимальной из возможных в данной ситуации оценки $S(t)$ в актуальном будущем. Таким образом, АЭ играет критериальную и целезадающую роль. От того, какими оценками снабжены образы, зависит принятие решений УС (как и в реальной жизни, основным способом управления субъектами является формирование у них качественных оценок образам, нужных управляющему субъекту). Образам из множества $\{O_k\}$, соответствующим целевому состоянию, задаются максимальные эмоциональные оценки, к ним УС и будет стремиться направлять ОУ. От правильности оценок всех (не только целевых) образов во многом зависит качество управления УС ААУ.

Актуаторами нашего ОУ пусть являются гипотетические двигатели, способные в моменты t придавать наноспутнику импульсы заданного дискретного значения в заданном направлении (в описываемом в статье примере использовались пять возможных значений по каждой из осей R и N , всего 25 вари-

антов) с вектором тяги, проходящим через центр масс (на момент написания статьи такие двигатели практически еще отсутствуют). Перенумеруем индексом j все возможные варианты таких импульсов и будем называть их действиями D_j . Напомним, что при увеличении скорости КА он переходит на более высокую орбиту, а при уменьшении — на более низкую. Поэтому, например, для простого сокращения дистанции между ведущим и ведомым спутниками, летящими по одной орбите, нужно совершить нетривиальный маневр.

Базу знаний строим в самом простом виде — в виде таблицы (рис. 4). Столбцы таблицы БЗ соответствуют номерам i образов исходного состояния O_i , строки — номерам j действий D_j . В клетку (i, j) таблицы записываем результат действия в виде: а) номеров k образов результатов O_k вместе с вероятностями их наблюдения и их эмоциональными оценками Z_k ; либо б) номера одного образа результата, если он как-то представляет все множество результатов (например, центр кластера) и его оценки; либо в) только эмоциональной оценки Z_k образа результата, если это устраивает разработчиков УС. Берем последний вариант в силу его простоты и достаточности в данном случае.

Заполнение БЗ эмпирическими данными происходит в процессе управления по архивным данным. Самым коротким архивом может служить буфер данных по трем последним тактам (здесь оценку результата мы смотрим на том же такте t , что и сам результат). В этом случае формула (2) понимается как формула, где все данные касаются прошедшего времени, включая текущий момент t :

$$(\{O_i(t-2)\} \& D_j(t-1)) \rightarrow \{O_k(t)\} \rightarrow \{Z_k(t)\}. \quad (3)$$

Такая запись может считаться элементарным эмпирическим знанием только в случае, если она наблюдалась в предыстории не менее, чем M раз, где число M — статистический показатель надежности знаний — задается вручную заранее и выбирается из рациональных соображений и с учетом допустимой вероятности ложной тревоги. В случае построения БЗ из нейронов, предложенных в теории

		Номер i образа исходного состояния $O_i(t)$					
		1	2	...	i	...	N
Номер j действия $D_j(t-1)$	1			
	2			

	j				$Z_{ij}(t+2)$...

	k			

Рис. 4. База знаний системы ААУ в виде прямоугольной таблицы

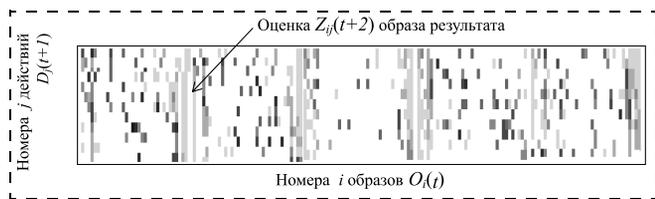


Рис. 5. Графическое отображение частично заполненной базы знаний

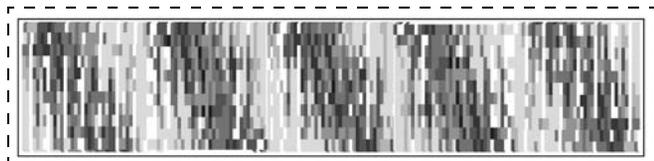


Рис. 6. Графическое отображение полностью заполненной базы знаний

ААУ, константа M является порогом обучаемости нейрона. На практике в нашем случае достаточно задать значение M как число от 5 до 10. Чем больше M , тем дольше обучается УС, но тем надежнее ее знания в смысле прогноза. При обучении УС не важно, каким способом выбирались действия D_j , это может быть случайный или целенаправленный выбор. Найденные закономерности вида (3) записываются в БЗ и могут использоваться ею для обоснованного прогнозирования при принятии решений. На рис. 5, 6 показаны скриншоты графического отображения табличной БЗ при двух стадиях ее заполнения, где более темным цветом показаны образы результатов с более высокими качественными оценками. Незаполненные ячейки БЗ — белые.

Принятие решений системой ААУ основано на прогнозировании, которое достигается экстраполяцией закономерности (3) на будущее, т. е. при распознавании УС ситуации $\{O_i(t)\}$ в БЗ находятся и отделяются все записи вида (2), соответствующие распознанному исходному образу O_i , и предъявляются блоку *принятия решений*, но со сдвинутыми в будущее моментами времени, т. е. в виде

$$(\{O_i(t)\} \& D_j(t+1)) \rightarrow \{O_k(t+2)\} \rightarrow \{Z_k(t+2)\}. \quad (4)$$

Блок принятия решений выбирает то действие $D_j(t+1)$, которое обещает результат с самой высокой из всего отдаленного набора суммарной оценкой результата $\{Z_k(t+2)\}$, что и соответствует цели максимизации суммарной эмоциональной оценки будущего состояния ОУ, повышая вероятность выживания ОУ. Если в БЗ не нашлось записей для текущей ситуации, то действие выбирается, например, случайно. Если нашлись несколько записей с равноценным результатом, то выбирается одно из них. Актуатору сообщается номер j выбранного действия, и оно реализуется. Если фактический результат статистически перестает совпадать с прогнозируемым, то запись в БЗ изменяется. Проблему комбинаторного взрыва можно решать, оптимизируя поисковые пространства множества образов и БЗ, например, с помощью генетических алгорит-

мов [6], а также применяя приемы нечеткой логики для построения в стиле метода ААУ образов и знаний [7].

Адаптивность управления состоит в автоматическом заполнении БЗ реальными статистическими закономерностями вида (2), даже если все остальные подсистемы не являются самообучаемыми. При необходимости самообучаемыми могут быть все подсистемы УС ААУ.

На рис. 7 показано графическое отображение демонстрационного окна программной модели. Справа условно изображен главный ведущий спутник, задающий движение по орбите для всей группы. За ним по той же орбите и с заданными дистанциями должны лететь ведомые спутники (в данном примере — два спутника). Вокруг ведомых спутников обозначены границы, внутри которых управление осуществляется с помощью их систем ААУ. За пределами этих границ управление осуществляется более грубыми детерминированными системами управления. Цель системы ААУ каждого ведомого спутника — научиться удерживать свой спутник в заданном положении относительно положения своего ведущего.

В процессе движения положение спутника относительно его ведомого спутника изменяется, во-первых, под действием естественных возмущающих факторов, а во-вторых, из-за управляющих воздействий двигателей, которые, по условиям нашей задачи, нельзя рассчитать очень точно и так, чтобы одно воздействие надолго удерживало спутник в заданном положении.

Для того чтобы показать процесс адаптации систем ААУ, нужно показать, как со временем уменьшаются флуктуации положений спутников вокруг заданных положений. Для этого следует измерять количественно качество управления Q спутником. Например, для оценки (в %) качества управления по оси R на временном окне с полушириной M мы использовали формулу

$$Q(t) = \left(1 - \left(\sum_{k=-M}^M |r(t - k\Delta t) - r_0(t - k\Delta t)| \right) / ((2M + 1)(r_{\max} - r_{\min})) \right) \cdot 100.$$

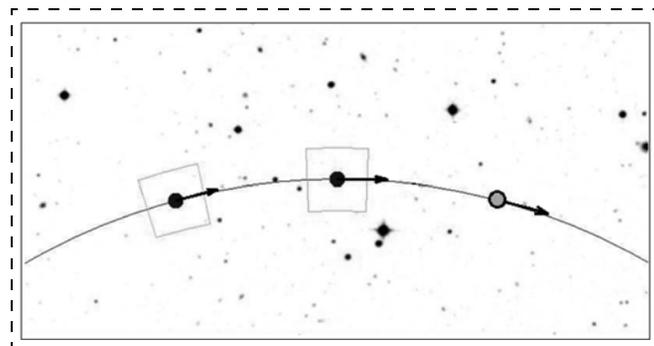


Рис. 7. Скриншот программного прототипа

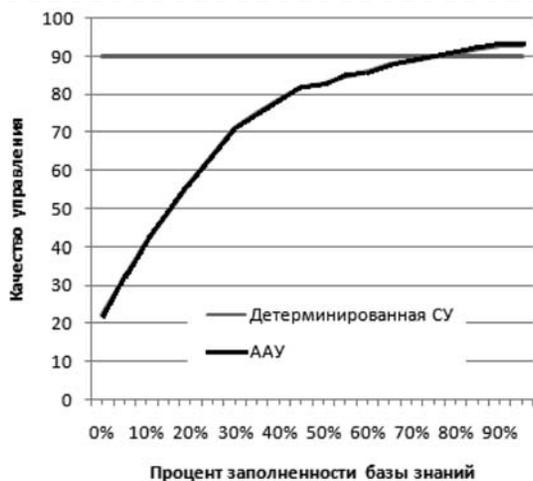


Рис. 8. Временной график качества управления спутниками в группе с помощью системы ААУ (черная линия) и детерминированной системой управления (серая линия). Для системы ААУ со временем растет количество накопленных в БЗ знаний

Чем меньше спутник отклоняется от своего целевого положения, тем выше значение оценки $Q(t)$ качества управления. Зависимость этого качества управления отдельным спутником от времени показана на рис. 8. Аналогично можно конструировать оценки качества управления и по другим осям и критериям, а также интегральные оценки.

Таким образом, показано, что системы ААУ отдельных робототехнических устройств, способные самообучаться поддержанию локального порядка в группе, могут в совокупности обеспечивать заданный глобальный порядок в группе. Очевидно, что на настоящем этапе трудно и преждевременно сравнивать конечные результаты предлагаемой инновационной системы управления с технико-экономическими показателями хорошо отлаженных

традиционных систем, да и практически действующих групп наноспутников, как и активных двигателей для наноспутников, в стране сегодня еще не существует. За рамками представляемых результатов НИР остались и такие вопросы, как выбор оптимальных характеристик маневров, выбор оптимальной целевой функции управления и многие другие, которые должны быть решены уже при выполнении соответствующих НИОКР специалистами, заинтересовавшимися достоинствами представленного подхода.

Список литературы

1. Жданов А. А. Автономный искусственный интеллект. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2008 г.
2. Жданов А. А. Метод автономного адаптивного управления // Известия Академии Наук. Теория и системы управления, 1999, № 5, с. 127–134.
3. Пулинец С. А., Романов А. А., Урличич Ю. М., Романов А. А., Дода Л. Н., Узунов Д. Первые результаты пилотного проекта по комплексному диагностированию предвестников землетрясений на Сахалине // Геомагнетизм и Аэронавигация. 2009. Т. 49, № 1. С. 123–132.
4. Романов А. А., Трусов С. В., Новиков А. В., Аджалова А. А., Романов А. А., Селин В. А. Восстановление двумерного распределения электронной концентрации ионосферы в плоскости орбиты низкоорбитальных ИСЗ на основе анализа характеристик когерентного излучения // Вопросы электромеханики, 2009. Т. 111, № 4. С. 37–42.
5. Романов А. А., Романов А. А., Урличич Ю. М. Томографические исследования ионосферы Земли с использованием кластеров малоразмерных космических аппаратов // Сб. трудов Междунар. науч. конф. Средиземноморского института прикладных наук, Московского физико-технического института, Института физико-технической информатики. Институт физико-технической информатики, 2011. С. 47–58.
6. Жданов А. А., Земских Л. В., Беляев Б. Б. Система стабилизации углового движения космического аппарата на основе нейроноподобной системы автономного адаптивного управления // Космические исследования. 2004. Т. 42, № 3. С. 1–15.
7. Караваев М. В., Жданов А. А. Построение нечетких контроллеров на основе метода автономного адаптивного управления // Сб. научн. тр. Всерос. научн.-техн. конф. "Нейроинформатика-2006". 2006. С. 31–37.

Method of Autonomous Adaptive Control Application for Group of Robots on Example of Nano-Satellite Cluster Model

A. A. Zhdanov¹, aazhdanov@ipmce.ru✉, A. A. Romanov², romanov48@yandex.ru,

A. A. Romanov², romulas@mail.ru, S. S. Semenov¹, semenovss@gmail.com,

¹ JSC "Lebedev Institute of Precision Mechanics and Computer Engineering Russian Academy of Sciences", Moscow, 119991, Russian Federation,

² JSC "Russian Space Systems", Moscow, 111250, Russian Federation

Corresponding author: Zhdanov Aleksandr A., D.Sc. Professor, Chief Researcher, JSC "Lebedev Institute of Precision Mechanics and Computer Engineering Russian Academy of Sciences", Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: aazhdanov@ipmce.ru

Received on August 24, 2015

Accepted on September 03, 2015

The paper presents first results of application of Autonomous Adaptive Control (AAC) method [4, 10] for adaptive control of group of robots on example of model of nano-satellite cluster. The AAC method is the biologically-inspired method, considerate to authors conceptual model of nervous system. From technical viewpoint the AAC system is self-learning recognition-control system, which has two goal functions: gnoseological one with goal of search and accumulation of knowledge and optimization one with goal of perform the optimal control of given controlled object. The AAC system contains subsystems: pattern formation and recognition, knowledge base, decision making, emotion modeling and some other subsystems. The AAC system

provides self-learning and control in one process. The AAC system works on base of empirical knowledge and does not use of mathematical models of controlled object. In case of robot group the AAC system is uses as individual control system of each robot. Each individual robot learns to keep local order in the group. The global order is the result of sum of local orders. As example we have used a model of cluster of nano-satellites in experiment of monitoring of ionosphere of Earth. In the space mission the group of nano-satellites has to keep global order in the space. In our approach individual AAC systems self-learn to keep local orders in the cluster. As result we can see obtaining of global order in the cluster. The AAC system gives more cheap approach to high quality control than other methods regards to its adaptive properties.

Keywords: distributed control, control of robots group, adaptive control, autonomous adaptive control, satellite cluster, nano-satellites, ionosphere monitoring

For citation:

Zhdanov A. A., Romanov A. A., Romanov A. A., Semenov S. S. Method of Autonomous Adaptive Control application for Group of Robots on Example of Nano-Satellite Cluster Model, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 11–18.

DOI: 10.17587/mau/17.11-18

References

1. Zhdanov A. A. *Avtonomniy iskusstvenniy intellect* (Autonomy artificial intelligence), Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy, 2008 (in Russian).
2. Zhdanov A. A. *Metod avtonomnogo adaptivnogo upravleniya* (Method of Autonomous Adaptive Control), *Izvestiya Akademii Nauk. Teoriya i Sistemy Upravleniya*, 1999, no. 5, pp. 127–134 (in Russian).
3. Pulinets S. A., Romanov A. A., Urlichich Ju. M., Romanov A. A., Doda L. N., Ouzounov D. *Pervye rezul'taty pilotnogo proekta po kompleksnomu diagnostirovaniyu predvestnikov zemletrjasenij na Sahaline* (The first results of the pilot project on complex diagnosing earthquake precursors on Sakhalin), *Geomagnetizm i Ajeronomija*, 2009, vol. 49, no. 1, pp. 123–132 (in Russian).
4. Romanov A. A., Trusov S. V., Novikov A. V., Adzhalova A. A., Romanov A. A., Selin V. A. *Vosstanovlenie dvumernogo raspredeleniya*

jelektronnoj koncentracii ionosfery v ploskosti orbity nizkoorbital'nyh ISZ na osnove analiza harakteristik kogerentnogo izluchenija (Reconstruction of the 2D distribution of the ionosphere electron concentration in orbit plane of LEO satellites on the basis of coherent signals characteristics analysis), *Voprosy Jeletromehaniki*, 2009, vol. 111, no. 4, pp. 37–42 (in Russian).

5. Romanov A. A., Romanov A. A., Urlichich Ju. M. *Tomograficheskie issledovaniya ionosfery Zemli s ispol'zovaniem klasterov malorazmernih kosmicheskikh apparatov* (Earth ionosphere tomography using small satellites clusters), *Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii Sredizemnomorskogo instituta prikladnykh nauk, Moskovskogo fiziko-tehnicheskogo instituta, Instituta fiziko-tehnicheskoy informatiki. Institut fiziko-tehnicheskoy informatiki*, 2011, pp. 47–58 (in Russian).

6. Zhdanov A. A., Zemskikh L. V., Belyaev B. B. *Sistema stabilizatsii uglovogo dvizheniya kosmicheskogo apparata na osnove neyronopodobnoy sistemi avtonomnogo adaptivnogo upravleniya* (System of Stabilization of angular motion of space craft on base of neuron-like Autonomous Adaptive Control system), *Kosmicheskie Issledovaniya*, 2004, vol. 42, no. 3, pp. 1–15 (in Russian).

7. Karavaev M. V., Zhdanov A. A. *Postroyeniye nechetkih kontrollerov na osnove metoda avtonomnogo adaptivnogo upravleniya* (Fuzzy controllers on base of the method of Autonomous Adaptive Control), *Trudi Vserossiyskoy Nauchno-Tehnicheskoy Konferencii Neiroinformatika-2006*, Moscow, 2006, МЭPhI, pp. 31–37 (in Russian).

УДК 681.5

DOI: 10.17587/mau.17.18-25

С. М. Власов¹, аспирант, vlasov.serge.m@gmail.com,

О. И. Борисов¹, аспирант, borisov@corp.ifmo.ru, В. С. Громов¹, аспирант, gromov@corp.ifmo.ru,

А. А. Пыркин¹, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., доц., a.pyrkin@gmail.com,

А. А. Бобцов^{1, 2}, д-р техн. наук, декан, зав. кафедрой, проф., bobtsov@mail.ru,

¹Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург,

²Институт проблем машиностроения, г. Санкт-Петербург

Алгоритмы адаптивного и робастного управления по выходу роботизированным макетом надводного судна*

Предлагаются два регулятора на основе метода последовательного компенсатора. Параметры рассматриваемого объекта управления неизвестны, а элементы его вектора состояния не измеряются. Первый регулятор является робастным с фиксированными коэффициентами, второй — с адаптивной настройкой параметров управления. Оба алгоритма были реализованы в робототехнической установке моделирования движения надводного судна.

Ключевые слова: многоканальные системы, адаптивное управление, робастное управление, система динамического позиционирования

Введение

Данная работа посвящена вопросам разработки и инженерной реализации систем динамического позиционирования. Такие системы предназначены для автоматического управления движением над-

водных судов [1, 2], что является крайне востребованным направлением в настоящее время. Разработка такого класса систем достаточно сложна в силу параметрической неопределенности математической модели, наличия внешних возмущающих воздействий, таких как качка, ветер, течение и др.

В работах [3–5] рассмотрены модели, состоящие из линейной части с неизвестными параметрами и статического нелинейного блока, для которых пред-

*Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (Госзадание 2014/190 (проект 2118), субсидия 074-U01. Проект 14.Z50.31.0031).

ложен алгоритм управления на основе принципа пассивации [6, 7]. Регулятор при этом имеет простую структуру и обеспечивает асимптотическую устойчивость замкнутой системы. В этом смысле предлагаемый в данной работе подход близок к результатам, представленным в работах [8–10], но с меньшими требованиями к модели объекта управления.

При разработке системы автоматического управления наряду с компьютерным моделированием необходимо проводить экспериментальные испытания. Поскольку использование реального судна дорогостояще, и высок риск поломки, то для проведения экспериментальных исследований была разработана робототехническая установка моделирования движения надводного судна с системой технического зрения для получения навигационных данных. Установка позволяет испытывать различные типы регуляторов.

В данной статье рассмотрены два регулятора, на базе которых реализуются системы динамического позиционирования, и представлены соответствующие результаты экспериментальных исследований на роботизированной установке. Первый регулятор — робастный с фиксированными параметрами управления, известный как последовательный компенсатор, второй — его адаптивная модификация с динамической настройкой параметров закона управления. С использованием прямого метода Ляпунова доказана теорема о глобальной асимптотической устойчивости замкнутой системы с первым регулятором [11, 13, 14]. Адаптивный вариант алгоритма формулируется в виде утверждения. Для конкретного прикладного применения этой схемы были получены удовлетворительные результаты экспериментальных исследований. С помощью обоих регуляторов решена задача стабилизации заданных значений положения и ориентации макета судна с некоторой точностью.

Постановка задачи

Рассматривается роботизированный макет надводного судна, являющийся составной частью экспериментальной установки. Он имеет основной двигатель с поворотной насадкой и два подруливающих устройства туннельного типа. При этом параметры объекта управления являются неизвестными. Скорость и ускорение макета судна не измеряются. Доступны измерению посредством средств технического зрения только координаты: положения по осям X и Y и курсовой угол, определяющий ориентацию в плоскости.

Требуется разработать два алгоритма управления роботизированным макетом надводного судна: ро-

бастный с фиксированными коэффициентами и адаптивный с динамической настройкой параметров управления. Обе схемы, составляя основу системы динамического позиционирования, должны обеспечивать следующую цель управления:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} |x^* - x(t)| &\leq \delta_x; \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |y^* - y(t)| &\leq \delta_y; \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |z^* - z(t)| &\leq \delta_z, \end{aligned} \quad (1)$$

где области $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ для робастного регулятора равны нулю, для адаптивного принимают некоторые ненулевые значения, заданные при экспериментальных исследованиях.

Построение математической модели

В данном разделе проанализируем математическую модель роботизированного макета надводного судна и выполним необходимые ее преобразования.

Рассмотрим конфигурацию расположения исполнительных приводов макета судна, представленную на рис. 1, а. Здесь P_e — основной двигатель, где также располагается рулевое соплó, P_b и P_s — носовое и кормовое подруливающие устройства соответственно.

Динамика движения надводного корабля такого типа может быть описана математической моделью, содержащей три динамических канала, соответствующих двум линейным и одной угловой координатам, однозначно определяющим положение и ориентацию судна в пространстве:

$$\begin{cases} \dot{x} = F(P_e, P_b, \alpha_e, P_s); \\ \dot{y} = G(P_e, P_b, \alpha_e, P_s); \\ \dot{z} = H(P_e, P_b, \alpha_e, P_s), \end{cases} \quad (2)$$

где x, y и z — выходные переменные; P_e, P_b и P_s — сигналы управления, отправляемые на исполнительные приводы; $F(\cdot), G(\cdot)$ и $H(\cdot)$ — нелинейные дифференциальные преобразования; α_e — значение поворота рулевого соплá, в рамках настоящей работы зафиксированное, поскольку малая рабочая область не позволяет обеспечивать повороты судна с большим радиусом циркуляции.

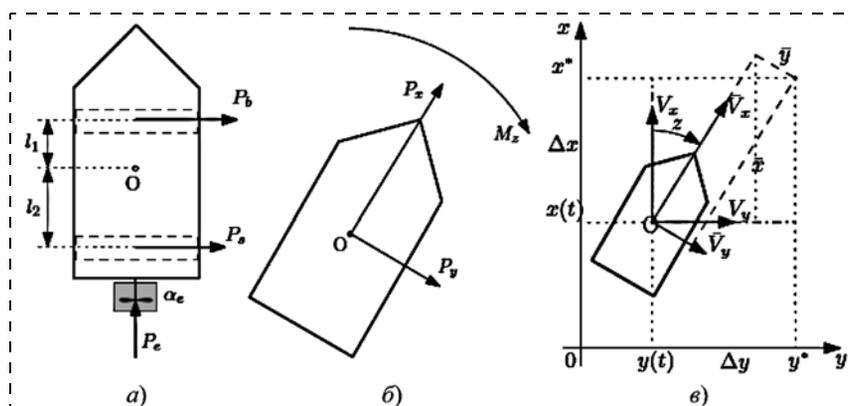


Рис. 1. Схема расположения исполнительных приводов (а); обобщенные силы и момент, действующие на объект (б); абсолютная и локальная системы координат (в)

Осуществим декомпозицию нелинейной динамической модели на статическую функцию и независимые динамические каналы с одним входом и одним выходом. Каждый из них соотнесем с соответствующими регулируемым переменными x , y и z . Введем так называемые виртуальные сигналы управления (см. рис. 1, б) P_x , P_y и M_z . Они являются обобщенными силами и моментом, действующими на судно, и представляют собой суперпозицию всех движущих сил исполнительных приводов корабля P_e , P_b и P_s . Выполняя декомпозицию, запишем систему уравнений, связывающих обобщенные силы и момент, прилагаемые к центру масс (ЦМ) корабля, и силы тяги исполнительных приводов с учетом схемы их расположения:

$$\begin{cases} P_x = P_e; \\ P_y = P_b + P_s; \\ M_z = -\alpha_e P_e l_0 + P_b l_1 - P_s l_2, \end{cases} \quad (1)$$

где P_x , P_y и M_z — обобщенные силы и момент, прилагаемые к ЦМ корабля; l_0 — расстояние от ЦМ до основного двигателя; l_1 — расстояние от ЦМ до носового подруливающего устройства; l_2 — расстояние от ЦМ до кормового подруливающего устройства.

Помимо абсолютной системы координат, связанной с Землей, введем в рассмотрение локальную, связанную с судном (рис. 1, в). Необходимо осуществить преобразование координат из одной системы в другую, с учетом их поворота и линейного смещения начал координат друг относительно друга:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos z & -\sin z \\ \sin z & \cos z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где x_0 , y_0 — координаты начальной точки; \bar{x} и \bar{y} — смещения, соответственно, в продольном и поперечном направлениях в локальной системе координат.

Модель каждого динамического канала может быть представлена в виде

$$y(t) = \frac{b(p)}{a(p)} u(t) + \frac{g(p)}{a(p)} \omega(t), \quad (3)$$

где $y(t)$ — регулируемая переменная, доступная измерению; $p = \frac{d}{dt}$ — оператор дифференцирования;

$a(p) = p^n + \dots + a_1 p + a_0$, $b(p) = b_m p^m + \dots + b_1 p + b_0$, $g(p) = g_r p^r + \dots + g_1 p + q_0$ — полиномы с неизвестными коэффициентами, причем $b(p)$ -гурвицев, $b_m > 0$ и $r \leq n - 1$; относительная степень передаточной функции $\frac{b(p)}{a(p)}$ предполагается известной, и для рассматриваемого объекта она принимается равной $\rho = n - m = 2$; нелинейная функция $\omega(t) = \varphi(y(t))$ удовлетворяет условию:

$$|\varphi(y)| \leq C_0 |y|, \quad \forall y, \quad (4)$$

где параметр C_0 является неизвестным.

Данный раздел посвящен синтезу закона управления для рассматриваемого многоканального объекта. Разработка алгоритма может быть разбита на два этапа. Сначала необходимо получить виртуальные входные сигналы P_x , P_y и M_z для каждого динамического канала рассматриваемой системы (обобщенные силы и момент). Для этого будем использовать метод последовательного компенсатора, описанный в работах [4, 15], с фиксированными параметрами регулятора. На следующем этапе необходимо распределить нагрузку между приводами судна, рассчитав управления P_e , P_b и P_s , которые после введения на них ограничений и масштабирования под формат команд подаются непосредственно на соответствующие приводы корабля.

Для стабилизации динамического канала рассматриваемой системы используем известный метод последовательного компенсатора. Следуя результатам, полученным в работах [4, 15], выберем закон управления в следующем виде:

$$u(t) = -\alpha(p)k\hat{y}(t), \quad (5)$$

$$k = (\mu + \kappa), \quad (6)$$

где параметр k для данной схемы управления является фиксированным; μ и полином $\alpha(p)$ такие, что передаточная функция $\frac{b(p)\alpha(p)}{a(p) + \mu b(p)\alpha(p)}$ строго вещественно-положительная; положительное число κ необходимо для компенсации неопределенности $\omega(t)$; функция $\hat{y}(t)$ является оценкой выхода $y(t)$ и вычисляется с помощью следующего алгоритма:

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \sigma \xi_2, \\ \dot{\xi}_2 = \sigma \xi_3, \\ \dots \\ \dot{\xi}_{\rho-1} = \sigma(-q_1 \xi_1 - \dots - q_{\rho-1} \xi_{\rho-1} + q_1 y), \end{cases} \quad (7)$$

$$\hat{y} = \xi_1, \quad (8)$$

где число $\sigma > k$, и параметры q_i выбираются так, чтобы система (9) была экспоненциально устойчива.

Перепишем модель оценки (9), (10) в матричной форме "вход — состояние — выход":

$$\dot{\xi}(t) = \sigma(\Gamma \xi(t) + dy(t)); \quad (9)$$

$$\hat{y}(t) = h^T \xi(t), \quad (10)$$

$$\text{где } \Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -q_1 & -q_2 & -q_3 & \dots & -q_{\rho-1} \end{bmatrix}, d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ q_1 \end{bmatrix}; h^T = [1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0].$$

Очевидно, что представленный алгоритм управления технически реализуем, поскольку содержит известные или измеряемые сигналы и соответствует принятым допущениям.

Рассчитаем модель замкнутой системы. Для этого подставим управление (7) в уравнение динамического канала судна (5). Получим

$$y(t) = \frac{b(p)}{a(p)} [-\alpha(p)k\hat{y}(t)] + \frac{g(p)}{a(p)} \omega(t) = \\ = \frac{b(p)}{a(p)} [-\alpha(p)ky(t) + \alpha(p)k\varepsilon(t)] + \frac{g(p)}{a(p)} \omega(t), \quad (11)$$

где $\varepsilon(t) = y(t) - \hat{y}(t)$ — рассогласование.

После простых преобразований для модели (13) имеем

$$(a(p) + \mu\alpha(p)b(p))y(t) = \\ = b(p)\alpha(p)[k\varepsilon(t) - \kappa y(t)]g(p)\omega(t) \quad (12)$$

и

$$y(t) = \frac{b(p)\alpha(p)}{a(p) + \mu\alpha(p)b(p)} [-\kappa y(t) + k\varepsilon(t)] + \\ + \frac{g(p)}{a(p) + \mu\alpha(p)b(p)} \omega(t), \quad (13)$$

где передаточная функция $W(p) = \frac{b(p)\alpha(p)}{a(p) + \mu\alpha(p)b(p)}$ строго вещественно-положительная.

Перепишем модель (15) из формы "вход — выход" в форму "вход — состояние — выход":

$$\dot{\chi}(t) = A\chi(t) + B(-\kappa y(t) + k\varepsilon(t)) + G\omega(t); \quad (14)$$

$$y(t) = C^T\chi(t), \quad (15)$$

где $\chi \in \mathbb{R}^n$ — вектор переменных состояния рассматриваемого динамического канала; A, B, C, G — матрицы, соответствующие переходу от модели (15) к (16), (17) в некотором базисе, соответствующих размерностей.

Поскольку передаточная функция $W(p)$ строго вещественно-положительна, тогда в соответствии с леммой Якубовича — Калмана

$$A^T P + PA = -R, \quad PB = C, \quad (16)$$

где $R = R^T$, и элементы матрицы R зависят от μ , но не зависят от κ .

Рассмотрим вектор отклонений

$$\eta(t) = hy(t) - \xi(t). \quad (17)$$

В силу структуры вектора h рассогласование $\varepsilon(t)$ примет вид

$$\varepsilon(t) = y(t) - \hat{y}(t) = h^T hy(t) - h^T \xi(t) = \\ = h^T (hy(t) - \xi(t)) = h^T \eta(t). \quad (18)$$

Продифференцируем $\eta(t)$:

$$\dot{\eta}(t) = h\dot{y}(t) - \sigma(\Gamma(hy(t) - \eta(t)) + dy(t)) = \\ = h\dot{y}(t) + \sigma\Gamma\eta(t) - \sigma(d + \Gamma h)y(t). \quad (19)$$

Обратим внимание, что $d = -\Gamma h$, тогда справедливо

$$\dot{\eta}(t) = h\dot{y}(t) + \sigma\Gamma\eta(t), \quad \varepsilon(t) = h^T\eta(t), \quad (20)$$

где матрица Γ — гурвицева за счет выбора параметров q_i модели оценки (9) и

$$\Gamma^T N + N\Gamma = -M, \quad (21)$$

где $N = N^T > 0$, $M = M^T > 0$.

Теорема. Рассмотрим нелинейную систему (16), (17). Пусть относительная степень объекта $\rho = n - m \geq 1$, и неизвестная функция $\omega(t) = \varphi(y(t))$ такая, что

$$|\varphi(y(t))| \leq C_0|y(t)| \text{ для всех } y(t), \quad (22)$$

где параметр C_0 неизвестен.

Существуют такие константы κ_0 и σ_0 , зависящие от параметров объекта, что для всех $\kappa \geq \kappa_0 > 0$ и $\sigma \geq \sigma_0 > 0$ нелинейная система (16), (17) экспоненциально устойчива в начале координат в смысле норм

$$(\|x(t)\|^2 + \|\eta(t)\|^2)^{1/2}. \quad (23)$$

Доказательство основано на методе функций Ляпунова. Выберем

$$V(t) = x^T(t)Px(t) + \eta^T(t)N\eta(t). \quad (24)$$

Дифференцируя (29) и выбирая $\sigma \geq \sigma_0$, $\kappa \geq \kappa_0$, где $\sigma_0 > 0$, $\kappa_0 > 0$, после необходимых преобразований получим

$$\dot{V}(t) \leq -\frac{\gamma_1}{\gamma_2} V(t), \quad (25)$$

где $\gamma_1 = \min\{\lambda_{\min}\{Q_1\}; \lambda_{\min}\{Q_2\}; \kappa\} > 0$. $\lambda_{\min}\{Q_1\}$ и $\lambda_{\min}\{Q_2\}$ — минимальные собственные числа матриц Q_1 и Q_2 ; $\gamma_2 = \max\{\lambda_{\max}\{P\}; \lambda_{\max}\{N\}; \kappa\} > 0$, $\lambda_{\max}\{P\}$ и $\lambda_{\max}\{N\}$ — минимальные собственные числа матриц P и N соответственно. Неравенство (27) подтверждает экспоненциальную устойчивость замкнутой системы. Полное доказательство представлено в работах [11, 13, 14].

В соответствии с постановкой задачи модель объекта управления может содержать неизвестные параметры. Допускается, что известна относительная степень. Будем рассматривать линеаризованную модель Номото первого порядка, которая описывает динамику надводного судна:

$$\ddot{\bar{x}}(t) = \frac{1}{T_x} (-\dot{\bar{x}}(t) + K_x P_x(t)); \quad (26)$$

$$\ddot{\bar{y}}(t) = \frac{1}{T_y} (-\dot{\bar{y}}(t) + K_y P_y(t)); \quad (27)$$

$$\ddot{\bar{z}}(t) = \frac{1}{T_z} (-\dot{\bar{z}}(t) + K_z M_z(t)), \quad (28)$$

где K_x, K_y и K_z — коэффициенты передачи; T_x, T_y и T_z — постоянные времени.

Представленный выше метод последовательного компенсатора применим для рассматриваемой модели роботизированного надводного судна с тремя независимыми динамическими каналами [4, 12–14]. Зная относительную степень объекта $\rho = 2$, используем полученный закон управления для расчета виртуальных управляющих сигналов P_x, P_y и M_z :

$$P_x = k_x(\xi_x + \dot{\xi}_x); \dot{\xi}_x = \sigma_x(-\xi_x + \bar{x}); \quad (29)$$

$$P_y = k_y(\xi_y + \dot{\xi}_y); \dot{\xi}_y = \sigma_y(-\xi_y + \bar{y}); \quad (30)$$

$$M_z = k_z(\xi_z + \dot{\xi}_z); \dot{\xi}_z = \sigma_z(-\xi_z + z^* - z(t)); \quad (31)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos z & \sin z \\ -\sin z & \cos z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^* - x(t) \\ y^* - y(t) \end{bmatrix}, \quad (32)$$

где $k_x, k_y, k_z, \sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ — фиксированные настроечные коэффициенты, которые могут быть выбраны независимо от параметров объекта.

Синтез адаптивного закона управления

Выберем закон управления в новой форме:

$$u(t) = -\alpha(p)[k(t)\hat{y}(t)]; \quad (33)$$

$$\dot{k}(t) = \gamma_k \hat{y}^2(t); k(0) > 0, \quad (34)$$

где $u(t)$ — управление; $k(t)$ — настраиваемый параметр, $\gamma_k > 0$ — положительный коэффициент. Переменная $\hat{y}(t)$ — оценка функции $y(t)$, которая определяется следующим образом:

$$\hat{y}(t) = h^T \xi(t), \quad (35)$$

$$\dot{\xi}(t) = \Gamma_\sigma \xi(t) + d_\sigma y(t), \quad (36)$$

где

$$\Gamma_\sigma = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ -k_1 \sigma^{\rho-1} & -k_2 \sigma^{\rho-2} & \dots & -k_{\rho-1} \sigma \end{bmatrix}, d_\sigma = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ k_1 \sigma^{\rho-1} \end{bmatrix}, \quad (37)$$

$$h^T = [1 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0], \quad (37)$$

коэффициенты $k_i, i = \overline{1, \rho-1}$, выбраны из условия гурвицевости матрицы Γ_σ при $\sigma = 1$, алгоритм настройки для параметра σ будет определен позднее.

Замечание 1. Заметим, что характеристический полином матрицы Γ_σ при $\sigma = 1$ имеет вид

$$D(p) = p^{\rho-1} + k_{\rho-1} p^{\rho-2} + \dots + k_2 p + k_1, \quad (38)$$

что означает, что коэффициенты $k_i, i = \overline{1, \rho-1}$, могут быть выбраны из условия гурвицевости полинома (40).

Перейдем к новому базису системы (37), (38):

$$\bar{\xi}(t) = T \xi(t), \quad (39)$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma^{-1} & \dots & 0 \\ \vdots & & & \\ 0 & 0 & \dots & \sigma^{-(\rho-2)} \end{bmatrix}. \quad (40)$$

Рассмотрим вектор рассогласования

$$\eta(t) = hy(t) - \bar{\xi}(t). \quad (41)$$

Пусть параметр σ будет настраиваться в соответствии с алгоритмом

$$\dot{\sigma}(t) = \gamma_\sigma \eta^T(t) \eta(t) \quad (42)$$

с некоторым положительным коэффициентом $\gamma_\sigma > 0$. Кроме того, $\sigma(0) \geq 1$.

Для того чтобы сформировать виртуальный сигнал управления, необходимо иметь $\rho - 1$ производных по времени от функции $k(t)\hat{y}(t)$. Из соотношений (38) и (39) видно, что в силу структуры матрицы Γ_σ для измерения доступны все производные функции $\hat{y}(t)$ вплоть до порядка $\rho - 1$, причем переменные ξ_i соответствуют производным $\hat{y}^{(i-1)}(t)$, а производная $\hat{y}^{(\rho-1)}(t)$ тождественно равна функции $\xi_{\rho-1}$, которая также доступна для формирования закона управления.

Продифференцировав $k(t)\hat{y}(t)$ последовательно $\rho - 1$ раз, с учетом (36)—(38) получим

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(k(t)\hat{y}(t)) &= \dot{k}(t)\hat{y}(t) + k(t)\dot{\hat{y}}(t) = \\ &= \gamma_k \hat{y}^3(t) + k(t)\dot{\hat{y}}(t) = \gamma_k \xi_1^3(t) + k(t)\xi_2(t); \end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dt^2}(k(t)\hat{y}(t)) &= 3\gamma_k \xi_1^2(t)\xi_2(t) + \gamma_k \xi_1^2(t)\xi_2(t) + \\ &+ k(t)\xi_3(t) = 4\gamma_k \xi_1^2(t)\xi_2(t) + k(t)\xi_3(t); \end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^3}{dt^3}(k(t)\hat{y}(t)) &= 8\gamma_k \xi_1(t)\xi_2(t) + 4\gamma_k \xi_1^2(t)\xi_3(t) + \\ &+ \gamma_k \xi_1^2(t)\xi_3(t) + k(t)\xi_4(t) = \\ &= 8\gamma_k \xi_1(t)\xi_2(t) + 5\gamma_k \xi_1^2(t)\xi_3(t) + k(t)\xi_4(t), \end{aligned} \quad (45)$$

и так далее вплоть до порядка $(\rho - 1)$.

Нетрудно видеть, что расчет закона управления в виде (35) возможен благодаря структуре (37)—(39). В общем виде формула для производной порядка $(\rho - 1)$ от функции $k(t)\hat{y}(t)$ будет представлять собой нелинейную комбинацию компонент вектора $\xi(t)$ и параметра $k(t)$.

Рассмотрим канал X линеаризованной модели надводного судна Номото первого порядка (28). Перепишем модель следующим образом:

$$\left(p^2 + \frac{1}{T_x}p\right)\bar{x}(t) = \frac{k_x}{T_x}P_x(t), \quad (46)$$

где относительная степень объекта $\rho = 2$.

Выберем гурвицев характеристический полином матрицы Γ_σ при $\sigma = 1$:

$$D(p) = p + 1. \quad (47)$$

Запишем алгоритм оценки (37) для функции $\hat{y}(t)$:

$$\hat{y}(t) = \xi(t); \quad (48)$$

$$\dot{\xi}(t) = -\sigma\xi(t) + \sigma y(t), \quad (49)$$

где

$$\Gamma_\sigma = -\sigma, d_\sigma = \sigma, h^T = 1. \quad (50)$$

Вычислим вспомогательный базис для системы (50), (51):

$$\bar{\xi}(t) = T\xi(t) = \sigma^{-1}\xi(t). \quad (51)$$

Вектор рассогласования может быть рассчитан следующим образом:

$$\eta(t) = hy(t) - \bar{\xi}(t) = y(t) - \sigma^{-1}\xi(t). \quad (52)$$

Затем воспользуемся алгоритмами адаптации (36) и (44) для настройки параметров $k(t)$ и $\sigma(t)$ соответственно, учитывая условия $k(0) > 0$ и $\sigma(0) \geq 1$.

Затем необходимо сформировать закон управления (35), используя соотношение (45) и (46). Продифференцируем функцию $k(t)\hat{y}(t)$ последовательно $\rho - 1$ раз:

$$\begin{aligned} u(t) &= -\alpha(p)[k(t)\hat{y}(t)] = -\frac{d}{dt}[k(t)\hat{y}(t)] - k(t)\hat{y}(t) = \\ &= -\gamma_k \xi^3(t) - k(t)\dot{\xi}(t) - k(t)\hat{y}(t). \end{aligned} \quad (53)$$

Для избежания роста функции $k(t)$ при малых отклонениях от положения равновесия перепишем закон адаптации (36) следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{k}(t) = \gamma_k \hat{y}_i^2(t), & |\hat{y}(t)| \geq \delta_i, & k(0) > 0, \\ \dot{k}(t) = 0, & |\hat{y}_i(t)| < \delta_i, \end{cases} \quad (54)$$

где обозначение i соответствует конкретному каналу $i = \{X, Y, Z\}$.

На следующем этапе для обеих схем управления (робастной и адаптивной) необходимо получить управляющие сигналы, которые будут отправляться непосредственно на двигатели. Иными словами, требуется распределить управление между исполнительными приводами. Это будет сделано в следующем разделе.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводили на робототехнической установке моделирования движения надводного судна (рис. 2, а, см. вторую сторону обложки), которая включает в себя роботизированный макет надводного судна (рис. 2, б, см. вторую сторону обложки), рабочий бассейн, цифровую камеру на штативе, джойстик для управления вручную, персональный компьютер. Макет судна выполнен в масштабе 1:32 и имеет следующие габаритные размеры: длина 432 мм, ширина 96 мм, высота 52 мм. Он содержит в своем составе основной двигатель, два подруливающих устройства туннельного типа на носу и корме, сервопривод для рулевого управления. В техническую оснастку лодки также входят аккумулятор и три печатные платы. На первой расположены входные порты, главный микроконтроллер, стабилизаторы напряжения и выпрямитель электропитания. На второй плате находится модуль беспроводной связи и блок преобразователя сигнала. Третья плата полностью состоит из трех драйверов приводов робота, которые получают сигнал с широтно-импульсной модуляцией, обрабатываемый вспомогательным микроконтроллером. Затем через блок полевых транзисторов соответствующее напряжение подается на исполнительные приводы. Бассейн представляет собой рабочую область для макета судна. Он выполнен из листов фанеры и вмещает около 150 л воды.

Для проведения экспериментальных исследований полученных выше алгоритмов управления требуется получить реальные управляющие сигналы для приводов судна и выполнить обратное преобразование статической нелинейности (3), т. е. распределить нагрузку движущей силы между всеми двигателями объекта. Осуществим это следующим образом. Задачу реализации движения по оси X возложим на основной двигатель. Кормовое подруливающее устройство будет выполнять позиционирование по оси Y . Носовое подруливающее устройство будет на 75 % выполнять задачу по вращению и на 25 % — позиционирования вдоль той же оси Y . Это необходимо ввиду технических нюансов, касающихся физического размещения приводов корабля. Таким образом, распределитель упоров будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} P_b = P_x; \\ P_s = P_y; \\ P_b = 0,75 \frac{M_z}{L_b} + 0,25 P_y. \end{cases} \quad (55)$$

Помимо распределителя упоров при практической реализации алгоритма необходимо наложить ограничения на управления и обеспечить соответствующий формат посылаемых команд.

Результат экспериментальных исследований робастного регулятора на основе последовательного

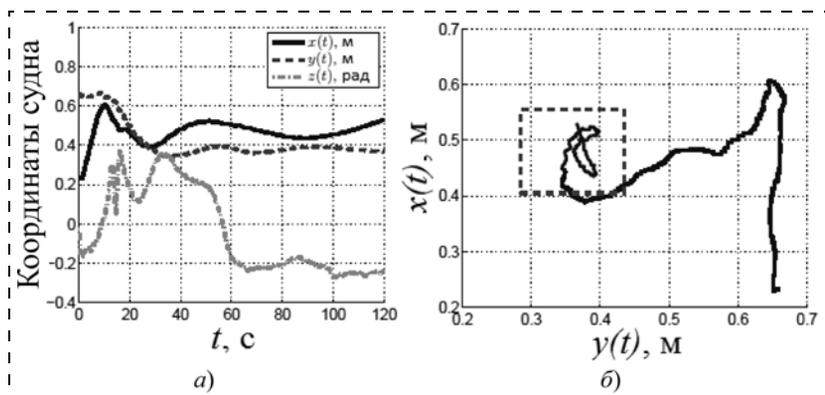


Рис. 3. Результаты экспериментальных исследований робастного регулятора: графики координат судна (а); путь следования (б)

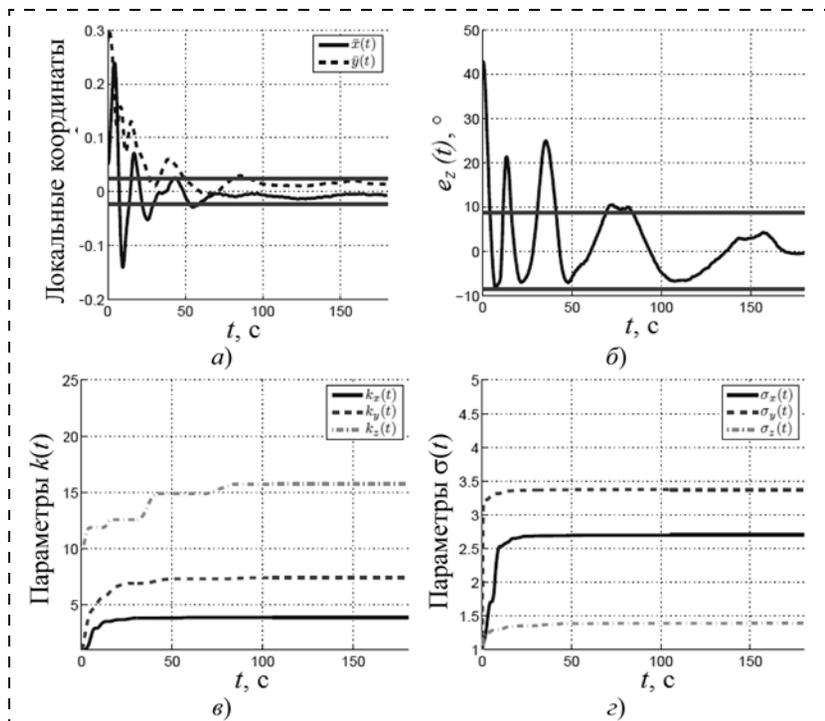


Рис. 4. Результаты экспериментальных исследований адаптивного регулятора: графики локальных координат (а); график ошибки по курсовому углу (б); графики параметров $k_x(t)$, $k_y(t)$, $k_z(t)$ (в); графики параметров $\sigma_x(t)$, $\sigma_y(t)$, $\sigma_z(t)$ (г)

компенсатора представлен на рис. 3. Параметры управления были выбраны следующие: $k_x = 2$, $k_y = 3$, $k_z = 12$, $\sigma_x = 10$, $\sigma_y = 10$, $\sigma_z = 17$. Желаемое положение лодки было задано: $x^* = 0,48$ м, $y^* = 0,36$ м, $z^* = 0^\circ$. Из графиков видно, как судно колеблется в окрестности желаемой точки под действием волн, которые сам наводит в процессе движения.

Результаты экспериментальных исследований динамического регулятора на основе адаптивной модификации последовательного компенсатора представлены на рис. 4. Желаемые положение и ориентация судна заданы такими же, как и в предыдущем эксперименте. Были выбраны следующие значения допустимых областей настройки параметров управления $\sigma_x = 0,024$ м, $\sigma_y = 0,024$ м, $\sigma_z = 8,6^\circ$.

Заключение

В рамках настоящей работы были разработаны алгоритмы робастного и адаптивного управления по выходу параметрически неопределенным объектом. Устойчивость робастного регулятора (последовательного компенсатора) доказана с помощью прямого метода Ляпунова. Адаптивная его модификация представляет собой практическую ценность, поскольку применима для конкретных частных случаев. В качестве направления дальнейшего развития можно выделить поиск строгого математического доказательства и необходимых условий устойчивости замкнутой системы с таким динамическим регулятором. Обе схемы были успешно апробированы на робототехнической установке моделирования движения надводного судна.

Список литературы

1. Fossen T. I. Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles. Marine Cybernetics AS, 2002.
2. Fossen T. I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. John Wiley & Sons Ltd., Hardcover, 2011.
3. Bobtsov A. A note to output feedback adaptive control for uncertain system with static nonlinearity // Automatica. 2005. Vol. 41, N. 12. P. 1277–1280.
4. Бобцов А. А., Николаев Н. А. Синтез управления нелинейными системами с функциональными и параметрическими неопределенностями на основе теоремы Фрадкова // Автоматика и телемеханика. 2005. № 1. С. 118–129.
5. Bobtsov A., Nikolaev N., Slita O. Adaptive control of libration angle of a satellite // Mechatronics. 2007. Vol. 17, Iss. 4–5. P. 271–276.
6. Fradkov A. L. Synthesis of adaptive system of stabilization of linear dynamic plants // Automation and Remote Control. 1974. Vol. 35, N. 12. P. 1960–1966.
7. Fradkov A. L. Passification of nonsquare linear systems and Yakubovich-Kalman-Popov Lemma // European Journal of Control. 2003. N. 6. P. 573–582.
8. Barkana I. Parallel Feedforward and Simplified Adaptive Control // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. 1987. Vol. 1, N. 2. P. 95–109.
9. Barkana I. Comment on 'Design of Strictly Positive Real Systems Using Constant Output Feedback // IEEE Transactions on Automatic Control. 2004. Vol. 49, N. 10. P. 2091–2093.
10. Kaufman H., Barkana I., Sobel K. S. Direct Adaptive Control Algorithms-Theory and Applications, Springer, New York, 1998 (2nd edition).
11. Pyrkin A., Bobtsov A., Kolyubin S., Surov M., Shavetov S., Borisov O., Gromov V. Simple Output Stabilization Approach for Robotic Systems // Manufacturing Modelling, Management, and Control. 2013. Vol. 7, N. 1. P. 1873–1878.
12. Bobtsov A., Pyrkin A., Faronov M. Output Control for Time-Delay Nonlinear System Providing Exponential Stability // The 19th Mediterranean Conference on Control and Automation (IEEE). 2011.
13. Pyrkin A., Bobtsov A., Kolyubin S., Faronov M., Shavetov S., Kapitanyuk Y., Kapitonov A. Output Control Approach "Consecutive Compensator" Providing Exponential and L-infinity-stability for Nonlinear Systems with Delay and Disturbance // Proc. IEEE Multi-Conference on Systems and Control, Denver, USA. 2011.
14. Pyrkin A., Bobtsov A. Output Control for Nonlinear System with Time-Varying Delay and Stability Analysis // 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference. Orlando, USA. 2011.
15. Бобцов А. А. Робастное управление по выходу линейной системой с неопределенными коэффициентами // Автоматика и телемеханика. 2002. № 11. С. 108–117.

Algorithms of Adaptive and Robust Output Control for a Robotic Prototype of a Surface Vessel

S. M. Vlasov¹, vlasov.serge.m@gmail.com, O. I. Borisov¹, borisov@corp.ifmo.ru✉,
V. S. Gromov¹, gromov@corp.ifmo.ru, A. A. Pyrkin¹, a.pyrkin@gmail.com,
A. A. Bobtsov^{1, 2}, bobtsov@mail.ru,

¹ ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russian Federation,

² Institute of Problems of Mechanical Engineering, St. Petersburg, 199178, Russian Federation

Corresponding author: **Borisov Oleg I.**, Postgraduate Student,
St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics,
St. Petersburg, 197101, Russian Federation, e-mail: borisov@corp.ifmo.ru

Received on August 24, 2015

Accepted on September 03, 2015

The paper is devoted to development of a dynamic positioning system for a robotic vessel prototype. Two control laws, each intended to solve the posed problem, are proposed in the work. The mathematical model of MIMO plant boils down to a static function, as well as three independent dynamical channels with single input and single output, which correspond to the coordinates of the vessel (two linear ones and an angle one). They define its position in the plane uniquely. The 1st order linearized Nomoto model, which approximately describes the surface vessel behavior, is used as a mathematical description of each channel. The parameters of the considered MIMO plant are assumed to be unknown. Elements of the state vector are not measured, i.e. the feedback is provided using only the position and orientation of the prototype. It is implemented using a digital camera attached to a tripod above the workspace. The video signal is processed in a computer by image binarization according to the color of the deck and the red mark on the bow. The centers of the obtained spots are detected and after simple calculations three required coordinates become available. Error signals between the specified values and outputs at each channel enter the regulators, which shape the so called virtual control inputs distributed by the inverse transformation among the actuators of the robot. Control commands in the required format are sent to the prototype via a radio channel. The first proposed regulator is robust and it has fixed control parameters in its structure. The second one has adaptation laws of these parameters. Both algorithms are implemented on the robotic setup of surface vessel motion modeling. During the experimental approval of the obtained algorithms the stabilization problem of the vessel prototype in the specified area is performed.

Keywords: multi-input/multi-output systems, adaptive control, robust control, dynamic positioning systems

Acknowledgements: The work was supported by the leading universities of the Russian Federation (2014/190 Goszadanie (Project 2118), 074 grant-U01, project 14.Z50.31.0031).

For citation:

Vlasov S. M., Borisov O. I., Gromov V. S., Pyrkin A. A., Bobtsov A. A. Algorithms of Adaptive and Robust Output Control for a Robotic Prototype of a Surface Vessel, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 18–25.

DOI: 10.17587/mau/17.18-25

References

1. Fossen T. I. Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles, Marine Cybernetics AS, 2002.
2. Fossen T. I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, John Wiley & Sons Ltd., Hardcover, 2011.
3. Bobtsov A. A note to output feedback adaptive control for uncertain system with static nonlinearity, *Automatica*, 2005, vol. 41, no. 12, pp. 1277–1280.
4. Bobtsov A. A., Nikolaev N. A. *Sintez upravleniya nelinejnymi sistemami s funkcional'nymi i parametricheskimi neopredelennostjami na osnove teoremy Fradkova* (Fradkov theorem-based design of the control of nonlinear systems with functional and parametric uncertainties), *Avtomatika i Telemekhanika*, 2005, no. 1, pp. 118–129 (in Russian).
5. Bobtsov A., Nikolaev N., Slita O. Adaptive control of libration angle of a satellite, *Mechatronics*, 2007, vol. 17, iss. 4–5, pp. 271–276.
6. Fradkov A. L. Synthesis of adaptive system of stabilization of linear dynamic plants, *Automation and Remote Control*, 1974, vol. 35, no. 12, pp. 1960–1966.
7. Fradkov A. L. Passification of nonsquare linear systems and Yakubovich-Kalman-Popov Lemma, *European Journal of Control*, 2003, no. 6, pp. 573–582.
8. Barkana I. Parallel Feedforward and Simplified Adaptive Control, *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 1987, vol. 1, no. 2, pp. 95–109.
9. Barkana I. Comment on 'Design of Strictly Positive Real Systems Using Constant Output Feedback', *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, vol. 49, no. 10, pp. 2091–2093.
10. Kaufman H., Barkana I., Sobel K. S. Direct Adaptive Control Algorithms-Theory and Applications, Springer, New York, 1998 (2nd edition).
11. Pyrkin A., Bobtsov A., Kolyubin S., Surov M., Shavetov S., Borisov O., Gromov V. Simple Output Stabilization Approach for Robotic Systems, *Manufacturing Modelling, Management, and Control*, 2013, vol. 7, no. 1, pp. 1873–1878.
12. Bobtsov A., Pyrkin A., Faronov M. Output Control for Time-Delay Nonlinear System Providing Exponential Stability, *The 19th Mediterranean Conference on Control and Automation (IEEE)*, Corfu, Greece, 2011.
13. Pyrkin A., Bobtsov A., Kolyubin S., Faronov M., Shavetov S., Kapitanyuk Y., Kapitonov A. Output Control Approach "Consecutive Compensator" Providing Exponential and L-infinity-stability for Nonlinear Systems with Delay and Disturbance, *Proc. IEEE Multi-Conference on Systems and Control*, Denver, USA, 2011.
14. Pyrkin A., Bobtsov A. Output Control for Nonlinear System with Time-Varying Delay and Stability Analysis, *50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, Orlando, USA, 2011.
15. Bobtsov A. A. *Robustnoe upravlenie po vyhodu linejnoy sistemoj s neopredelennymi koefitsientami* (Robust Output-Control for a Linear System with Uncertain Coefficients), *Avtomatika i Telemekhanika*, 2002, no. 11, pp. 108–117 (in Russian).

А. В. Гулай, канд. техн. наук, зав. кафедрой, altaj@tut.by, **В. М. Зайцев**, канд. техн. наук, доц., is@bntu.by, Белорусский национальный технический университет, Минск

Достоверность передачи транзакций в мехатронных системах: выбор триплетов помехоустойчивого кода

Представлена технология рационального выбора триплетов помехоустойчивого кода для обеспечения требуемого уровня достоверности передачи транзакций в мехатронных системах. Предложенная технология основана на введении базовой функции W вероятностей образования битовых ошибок различной кратности в кодовых блоках транзакции и функции L предельно допустимых вероятностей наличия остаточных ошибок в каждом из кодовых блоков. Критериальное условие $W \leq L$ обеспечивает рациональное выделение групп триплетов, допустимых для создания кодовых блоков передачи транзакций с необходимой достоверностью на каналах заданного качества.

Ключевые слова: мехатронная система, передача транзакций, достоверность передачи, помехоустойчивый код

Введение

В большинстве мехатронных систем используются типовые циклы адаптивного управления, позволяющие в параллельно-последовательном режиме организовать выполнение следующих основных действий [1]:

- сбор, обработку и накопление информации о текущем состоянии объекта, которая формируется с помощью сенсорных источников и вычислительного оборудования мехатронной системы и в необходимом темпе передается в орган управления;
- выработку органом управления требуемых управляющих воздействий и соответствующих им команд;
- доведение команд до объекта и их отработку исполнительными механизмами мехатронной системы.

Информационная совместимость составных частей мехатронной системы достигается за счет применения унифицированных телеметрических и телематических транзакций. Возможная логическая структура транзакции включает служебный заголовок и тело транзакции, причем адресная часть заголовка содержит значения системного идентификатора телеметрического (телематического) канала, типа транзакции, ее текущего номера. В соответствии с этим тело транзакции имеет обозначения номера канала, типа команды или параметра и двоичного кода времени; здесь же отражается двоичный код параметра или команды и код имитозащиты.

Служебный заголовок транзакции содержит ограниченное число логических полей, и при введении в заголовок адресных атрибутов для работы в сетевом режиме объем (длина) служебного заголовка может достигать 64 бит. В теле транзакции

для представления информации об одном параметре достаточно трех логических полей общей длиной в 48 бит, а для размещения кода имитозащиты — одного поля длиной в 32 бита [2].

Современные усредненные технические требования устанавливают, что мехатронная система с помощью одной транзакции должна обеспечивать работу одновременно не менее чем с 20 информационными параметрами или управление по 20 координатам фазового пространства [1]. Указанные требования могут быть выполнены при общем полезном информационном объеме транзакции $n_{\text{инф}} = 1056$ бит, в котором суммарный объем служебного заголовка и кода имитозащиты составляет 96 бит, при этом 960 бит отводится под непосредственное представление телеметрических и телематических данных. В зависимости от конкретного функционального назначения системы эти параметры могут уточняться.

Для устойчивого и корректного функционирования мехатронного оборудования необходимо обеспечивать определенную достоверность передачи телеметрических и телематических транзакций. Количественно достоверность оценивается вероятностью $P_{\text{дост}}$ того, что в транзакции не содержатся искаженные биты, обусловленные процессами передачи телеметрической или телематической информации по каналу. Этот параметр исходно определяется исключительно уровнем ответственности системы и обычно устанавливается в пределах 0,99...0,999 [3,4].

Следует отметить также, что технические решения, принимаемые при проектировании мехатронной системы, существенно зависят от используемых трактов передачи транзакций. Например, радиоканалы имеют относительно высокие значения

вероятности ошибок $P_{\text{ош}} = 0,01...0,0005$ в расчете на один передаваемый бит, в то время как проводные и волоконно-оптические каналы имеют вероятности ошибок $P_{\text{ош}} = 10^{-4}...10^{-6}$ и даже более низкие значения [4].

Для достижения требуемой достоверности передачи транзакций по каналам применяются методы помехоустойчивого кодирования, анализу которых посвящено значительное число исследований и, соответственно, научно-технических публикаций. Так, например, известно установление верхней границы Хемминга, а также введение других оценок объемов помехоустойчивого кода, результаты исследования которых представлены в работах [5–7]. Однако до настоящего времени в общем случае не установлены аналитические соотношения, приемлемые для инженерных расчетов, между длиной кода, числом контрольных разрядов и минимальным кодовым расстоянием.

При проектировании конкретной мехатронной системы разработчику необходимо корректно сформулировать и выполнить предварительное решение задачи многопараметрической нелинейной дискретной оптимизации. Это, как правило, вызывает трудности теоретического и практического характера, а в ряде случаев приводит к применению не до конца осознанных и недостаточно обоснованных вариантов реализации информационных процессов.

В связи с вышеизложенным в данной статье представлен анализ технологии рационального выбора триплетов помехоустойчивого кода для обеспечения требуемого уровня достоверности передачи транзакций в мехатронных системах. Данная технология основана на использовании определенных вспомогательных функций: базовой функции вероятностей образования битовых ошибок различной кратности в кодовых блоках транзакции и функции предельно допустимых вероятностей наличия остаточных ошибок в каждом из кодовых блоков. Указанные функции связаны между собой критериальным условием, отражающим статистическую возможность компенсации негативных явлений за счет применения определенных триплетов помехоустойчивого кода. Механизмом возникновения отрицательных эффектов, снижающих достоверность передачи транзакций, может быть появление в кодовых блоках кратных битовых ошибок. Введение критериального условия обеспечивает выделение групп триплетов, допустимых для создания кодовых блоков передачи транзакций с требуемой достоверностью.

Постановка задачи по обеспечению достоверности передачи транзакций в мехатронных системах

Предположим, что в мехатронной системе требуется организовать передачу потока транзакций с общим полезным информационным объемом $n_{\text{инф}}$ бит одной транзакции и обеспечить достоверность ее данных не ниже уровня $P_{\text{дост}}$ на основе некото-

рого блочного помехоустойчивого кода G . Применение указанного кода требует предварительного расчленения транзакции на $R_{\text{бл}}$ отдельных кодовых блоков, которые подлежат самостоятельной передаче по каналу. Блочные помехоустойчивые коды принято отображать триплетами (n, k, d) . Каждому допустимому значению n триплета соответствует определенное число k информационных и r контрольных битов ($k + r = n$). Соотношение битов в паре k, r триплета определяется минимальным расстоянием Хемминга d , при этом $r(d)$ является возрастающей дискретной нелинейной функцией [8, 9].

Разрешенные к применению в блочном коде G триплеты фиксированы и образуют конечное дискретное множество $\{n_i, k_i, d_i\}; i = 1, 2, \dots, U$. Кратность битовых ошибок t в кодовом блоке, исправляемых кодом G , определяется известным соотношением $t \leq (d - 1)/2$ [8]. Число кодовых блоков в составе транзакции с учетом помехоустойчивого кодирования G при использовании триплета $\{n_i, k_i, d_i\}$ соответствует верхней целочисленной границе отношения $n_{\text{инф}}/k_i; R_{\text{бл}} = \sup[n_{\text{инф}}/k_i]$. Требуемая достоверность передачи одного кодового блока связана с достоверностью передачи всей транзакции степенной зависимостью вида $P_{\text{дост.бл}} = P_{\text{дост}}^{1/R_{\text{бл}}}$, а фактический объем транзакции $n_{\text{факт}}$ определяется произведением $n_{\text{факт}} = R_{\text{бл}} n_i$.

В целях предотвращения чрезмерного расширения транзакции и уменьшения при этом ее фактического объема $n_{\text{факт}}$ целесообразно снижение общего числа кодовых блоков $R_{\text{бл}}$ за счет применения триплетов с более высокой информационной емкостью k_i . Одновременно с увеличением k_i для обеспечения необходимой достоверности передачи каждого кодового блока $P_{\text{дост.бл}}$ требуется наращивать корректирующие свойства кода G путем расширения минимального расстояния Хемминга d_i и, следовательно, числа используемых контрольных разрядов $r_i(d_i)$. В условиях фиксированного дискретного множества разрешенных триплетов и ограниченности их выбора данный процесс, в свою очередь, сопровождается обратным явлением — нелинейным скачкообразным уменьшением фактического числа информационных битов k_i в каждом кодовом блоке и ростом общего числа кодовых блоков в транзакции $R_{\text{бл}}$. В этих условиях взаимной зависимости указанных величин требуется выбрать рациональные параметры помехоустойчивого кодирования для обеспечения успешной передачи транзакций.

Таким образом, фактический объем транзакций $n_{\text{факт}}$ тесно связан с обеспечением требуемой достоверности их передачи. Кроме того, он существенно влияет на временные соотношения всех процессов информационного обмена в мехатронной системе, поскольку основная составляющая времени передачи транзакции T определяется отношением $T = n_{\text{факт}}/V$, где V — номинальная скорость

передачи битов по каналу. Очевидно, что в общем случае необходим рациональный выбор триплетов помехоустойчивого кода G , минимизирующих параметр $n_{\text{факт}}$ при условии обеспечения требуемой достоверности $P_{\text{дост}}$.

Выбор параметров помехоустойчивого кодирования для обеспечения успешной передачи транзакций

Для решения поставленной задачи предлагается достаточно универсальная технология рационального выбора триплетов помехоустойчивого кода, которая основывается на введении двух вспомогательных функций:

- базовой функции $W(P_{\text{ош}}, n_i, s)$ вероятностей образования ошибок кратности не ниже s в каждом кодовом блоке объемом n_i бит при его передаче по симметричному каналу с вероятностью возникновения битовых ошибок $P_{\text{ош}}$;
- функции $L(P_{\text{дост}}, n_{\text{инф}}, n_i, r_i, t_i)$ предельно допустимых вероятностей наличия остаточных ошибок в каждом кодовом блоке при условии достижения требуемой достоверности передачи транзакции $P_{\text{дост}}$ за счет выявления и исправления кодом G битовых ошибок кратности t_i .

Базовая функция определяется следующей биномиальной зависимостью:

$$\begin{aligned} W(P_{\text{ош}}, n_i, s) = & 1 - (1 - P_{\text{ош}})^{n_i} - \\ & - C_{n_i} P_{\text{ош}} (1 - P_{\text{ош}})^{n_i-1} - C_{n_i}^2 P_{\text{ош}}^2 (1 - P_{\text{ош}})^{n_i-2} - \\ & - \dots - C_{n_i}^{n_i-s-2} P_{\text{ош}}^{s-2} (1 - P_{\text{ош}})^{n_i-s-2} - \\ & - C_{n_i}^{n_i-s-1} P_{\text{ош}}^{n_i-s-2} (1 - P_{\text{ош}})^{n_i-s-1}. \end{aligned}$$

Все параметры, определяющие значение функции $W(P_{\text{ош}}, n_i, s)$, зависят исключительно от физических свойств используемого канала и выбранной длины кодового блока для расчленения транзакций, т. е. от используемого триплета $\{n_i, k_i, d_i\}$. Данная функция отражает отношения между парой компонентов процесса передачи транзакций: между каналом передачи кодовых блоков транзакций и самими кодовыми блоками. В целях получения исчерпывающей информации для последующего технического анализа результатов решения задачи при рациональном уровне вычислительной сложности принципиальное значение имеет оценка области определения базовой функции.

Диапазон определения вероятностей $P_{\text{ош}}$ целесообразно задавать достаточно широким с образованием дискретной логарифмической сетки возможных практических значений в пределах от $1 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-2}$. Выбор значений объемов n_i кодового блока транзакции не может быть произвольным, он регламентируется видом применяемой системы помехоустойчивого кодирования, типом конкретных кодов G и разрешенными к применению триплетными $\{n_i, k_i, d_i\}$; $i = 1, 2, \dots, U$ [8, 9]. Рас-

сматриваемая кратность s возможных битовых ошибок в кодовом блоке транзакции может быть ограничена значениями от 1 до 5, так как построение средств передачи информации с использованием, например, радиоканалов крайне низкого качества и кодовых блоков при кратности ошибок $s \geq 5$ практической значимости для создания мехатронных систем не имеет.

Функция предельно допустимых вероятностей наличия остаточных ошибок в каждом кодовом блоке при условии достижения требуемой достоверности передачи транзакции $P_{\text{дост}}$ за счет выявления и исправления кодом G битовых ошибок кратности t_i может быть задана следующей совокупностью дискретных значений:

$$\begin{aligned} L(P_{\text{дост}}, n_{\text{инф}}, n_i, r_i, t_i) = \\ = 1 - P_{\text{дост}}^{1/R_{\text{бл}}} = 1 - P_{\text{дост}}^{1/\sup\{n_{\text{инф}}/k_i\}} = \\ = 1 - P_{\text{дост}}^{1/\sup\{n_{\text{инф}}/\{n_i - r_i(d_i = 2t_i - 1)\}\}}. \end{aligned}$$

Значения функции $L(P_{\text{дост}}, n_{\text{инф}}, n_i, r_i, t_i)$ зависят исключительно от требуемых параметров достоверности передачи транзакций и индивидуальных характеристик используемого триплета $\{n_i, k_i, d_i\}$ помехоустойчивого кода G .

Применение введенных функций позволяет для блочного помехоустойчивого кода G провести обоснованный отбор допустимых решений путем проверки выполнения основного критериального условия:

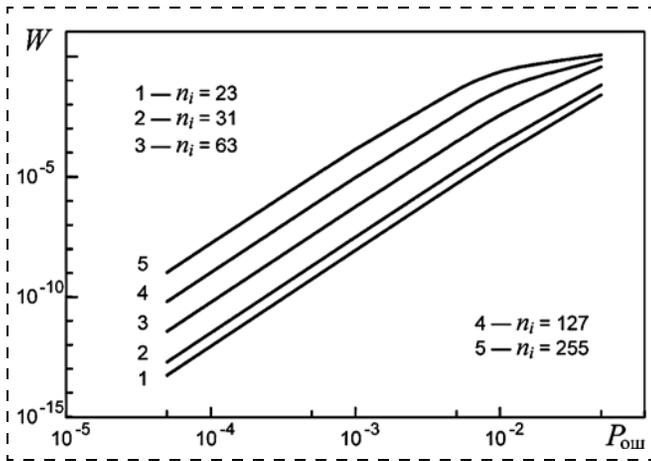
$$W(P_{\text{ош}}, n_i, s) \leq L(P_{\text{дост}}, n_{\text{инф}}, n_i, r_i, t_i).$$

Данное критериальное условие отражает статистическую возможность компенсации негативных явлений, связанных с появлением в кодовых блоках битовых ошибок кратности s . Компенсация осуществляется за счет применения триплета $\{n_i, k_i, d_i\}$ помехоустойчивого кода G , с помощью которого реализуется процесс выявления и исправления ошибок кратности t_i . Данное условие учитывает потенциальную возможность информационного самопоглощения (т. е. информационной деградации) процесса помехоустойчивого кодирования. Одновременно в конкретном коде G оно обеспечивает рациональное выделение группы триплетов, статистически допустимых для создания кодовых блоков передачи транзакций с требуемой достоверностью на каналах заданного качества. После этого в выделенной группе могут быть отмечены триплеты, при использовании которых минимизируется значение $n_{\text{факт}}$.

Для каналов информационного взаимодействия составных частей мехатронной системы выбор параметров и алгоритмов помехоустойчивого кодирования является одним из основных этапов инженерного проектирования дистанционных интерфейсов. В системах блочного кодирования для каналов с независимыми ошибками лучшим конструктивизмом в смысле соотношений $k, r(d)$ три-

Триплеты $\{n_i, k_i, d_i\}$ помехоустойчивого кода G

n_i	23	31				63				127				255			
k_i	12	26	21	16	11	56	51	45	39	120	113	106	99	247	239	231	223
d_i	7	3	5	7	9	3	5	7	9	3	5	7	9	3	5	7	9



Зависимость базовой функции $W(P_{\text{ош}}, n_i, s = 4)$ от $P_{\text{ош}}$ и параметра n_i

плетов обладают БЧХ-коды [8, 9]. Для задания конкретных значений параметра n_i могут быть использованы результаты, полученные применительно к примитивным БЧХ-кодам (табл. 1) [9] (в указанной работе приведены также соответствующие порождающие полиномы).

Для БЧХ-кодов с $d = 7$ ($t \leq 3$) значение параметра $s \geq 4$, а базовая функция вероятностей образования ошибок кратности не ниже 4 в каждом кодовом блоке объемом n_i бит принимает следующий вид:

$$W(P_{\text{ош}}, n_i, s = 4) = 1 - (1 - P_{\text{ош}})^{n_i} - n_i P_{\text{ош}} (1 - P_{\text{ош}})^{n_i - 1} - [n_i(n_i - 1)/2] P_{\text{ош}}^2 (1 - P_{\text{ош}})^{n_i - 2} - [n_i(n_i - 1)(n_i - 2)/6] P_{\text{ош}}^3 (1 - P_{\text{ош}})^{n_i - 3}.$$

Результаты расчета базовой функции $W(P_{\text{ош}}, n_i, s = 4)$ для практически значимых дискретных зна-

чений $P_{\text{ош}}$ и дискретных параметров n_i представлены на рисунке.

Оценка вероятности наличия остаточных ошибок в кодовых блоках транзакций

По предлагаемой методике оценивали область обеспечения предельно допустимых вероятностей наличия остаточных ошибок в кодовых блоках и требуемой достоверности передачи транзакций. В табл. 2 приведены значения функции предельно допустимых вероятностей наличия остаточных ошибок в каждом кодовом блоке при условии, что достоверность передачи транзакции достигает уровня 0,999, выявляются и исправляются битовые ошибки кратности не ниже 3. При этом информационный объем транзакции выбран равным 1056 бит.

Результаты сопоставления данных табл. 2 и значений базовой функции $W(P_{\text{ош}}, n_i, s)$ с проверкой выполнения основного критериального условия для $s \geq 4$ (вариант выявления и исправления ошибок кратности не ниже 3) представлены в табл. 3.

Анализ полученных результатов позволяет сформировать следующие возможные решения:

- при необходимости организации работы мехатронной системы на каналах с $P_{\text{ош}} = 5 \cdot 10^{-2}$ ни один из представленных триплетов БЧХ-кода с $t_i \leq 3$ ($d_i = 7$) не обеспечивает передачу транзакций с требуемой достоверностью, и необходимо либо применение каналов более высокого качества, либо использование иного кода G ;
- для организации работы мехатронной системы на каналах с $P_{\text{ош}} = 1 \cdot 10^{-2}$ могут быть применены БЧХ-коды с $t_i \leq 3$ ($d_i = 7$) в виде двух триплетов: (23, 12, 7) и (31, 16, 7); они обеспечивают передачу транзакций с требуемой достоверностью, при этом код Голя как частный случай БЧХ-кода, которому соответствует триплет (23, 12, 7), более

Таблица 2

Вероятность наличия остаточных ошибок

Параметры достоверности передачи транзакций	Триплеты БЧХ-кода				
	(23, 12, 7)	(31, 16, 7)	(63, 45, 7)	(127, 106, 7)	(255, 231, 7)
Число кодовых блоков в транзакции при ее объеме $n_{\text{инф}} = 1056$ бит	88	71	24	10	5
Коэффициенты избыточности кодов	0,478	0,484	0,286	0,165	0,094
Предельно допустимые вероятности наличия остаточных ошибок в кодовых блоках для достижения $P_{\text{дост}} = 0,999$	$1,14 \cdot 10^{-5}$	$1,41 \cdot 10^{-5}$	$4,17 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$
Объем транзакций с учетом помехоустойчивого кодирования блоков, бит	2048	2201	1512	1270	1275

Обеспечение достоверности передачи транзакций

Вероятность битовых ошибок $P_{\text{ош}}$ в канале	Триплеты БЧХ-кода				
	(23, 12, 7)	(31, 16, 7)	(63, 45, 7)	(127, 106, 7)	(255, 231, 7)
$1 \cdot 10^{-6}$	+	+	+	+	+
$5 \cdot 10^{-6}$	+	+	+	+	+
$1 \cdot 10^{-4}$	+	Область обеспечения предельно допустимых вероятностей наличия остаточных ошибок в кодовых блоках			+
$5 \cdot 10^{-4}$	+				+
$1 \cdot 10^{-3}$	+	+	+	–	–
$5 \cdot 10^{-3}$	+	+	–	–	–
$1 \cdot 10^{-2}$	+	+	–	–	–
$5 \cdot 10^{-2}$	–	–	–	–	–
Вероятность наличия остаточных ошибок в кодовом блоке при $t_i \leq 3$	0,026 при $P_{\text{ош}} > 5 \cdot 10^{-2}$	0,067 при $P_{\text{ош}} > 5 \cdot 10^{-2}$	0,025 при $P_{\text{ош}} \geq 1 \cdot 10^{-2}$	0,004 при $P_{\text{ош}} \geq 5 \cdot 10^{-3}$	0,00014 при $P_{\text{ош}} \geq 1 \cdot 10^{-3}$

предпочтителен, он дает наименьший фактический объем транзакции на уровне 2048 бит;

- в случае организации работы мехатронной системы на каналах при $5 \cdot 10^{-3} \leq P_{\text{ош}} \leq 1 \cdot 10^{-2}$ могут быть применены БЧХ-коды с $t_i \leq 3$ ($d_i = 7$) в виде трех триплетов: (23, 12, 7), (31, 16, 7), (63, 45, 7); все они обеспечивают передачу транзакций с требуемой достоверностью, при этом более предпочтителен триплет (63, 45, 7), который дает наименьший фактический объем транзакций на уровне 1512 бит;
- при необходимости организации работы мехатронной системы на каналах с $P_{\text{ош}} \leq 1 \cdot 10^{-3}$ могут быть применены БЧХ-коды с $t_i \leq 3$ ($d_i = 7$) в виде четырех триплетов: (23, 12, 7), (31, 16, 7), (63, 45, 7), (127, 106, 7); они обеспечивают передачу транзакций с требуемой достоверностью, при этом более предпочтителен код (127, 106, 7), дающий наименьший фактический объем транзакций на уровне 1275 бит.

Представленные результаты являются средними; граница выделенной допустимой области задается последней строкой табл. 3. Дополнительные расчеты показали, что уменьшение или увеличение вероятности $P_{\text{дост}}$ сопровождается соответствующим активным расширением или сужением допустимой области. В то же время эффект от применения триплетов со значениями $t_i \leq 4$ ($d_i = 9$) относительно невысок — наблюдается лишь незначительное расширение допустимой области. Следует отметить также, что возможность применения рассматриваемой технологии при явно выраженном группировании ошибок и образовании их серий может быть обеспечена путем введения процедур перемежения битов в кодовых блоках или за счет применения кода Файра [9].

Заключение

Для обеспечения заданного уровня достоверности передачи транзакций по каналам, например в мехатронных системах, необходимо помехоустойчи-

вое кодирование. Повышение достоверности передачи выполняется за счет рационального выбора триплетов помехоустойчивого кода, позволяющего минимизировать фактический объем транзакций. Представленная в работе технология выбора указанных триплетов основана на сравнении функций, характеризующих вероятности образования ошибок в каналах передачи. Одной из указанных функций является вероятность W образования ошибок определенной кратности в каждом кодовом блоке при его передаче по каналу с известной скоростью возникновения битовых ошибок. Другая функция — предельно допустимая вероятность L наличия остаточных ошибок в кодовом блоке при достижении требуемой достоверности за счет исправления кодом битовых ошибок определенной кратности.

Рациональный выбор триплетов помехоустойчивого кода в целях повышения достоверности передачи транзакций определяется введенным критериальным условием $W \leq L$. С использованием предложенной методики выбора триплетов помехоустойчивого кода выполнена оценка области обеспечения предельно допустимой вероятности наличия остаточных ошибок в кодовых блоках и требуемой достоверности передачи транзакций. Полученные результаты позволили сформировать возможные решения по выбору фиксированных триплетов помехоустойчивого кода в зависимости от скорости битовых ошибок в канале транзакции, достоверности передачи блока транзакции, а также ее допустимого общего объема.

Список литературы

1. Федотов А. В. Использование методов теории автоматического управления при разработке мехатронных систем. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007. 84 с.
2. Харин Ю. С., Берник В. И., Матвеев Г. В., Агиевич С. В. Математические и компьютерные основы криптологии. Минск: Новое знание, 2003. 382 с.
3. Смит С. Цифровая обработка информации. М.: Издательский дом "ДодЭка-XXI", 2008. 720 с.

4. **Феер К.** Беспроводная цифровая связь. М.: Радио и связь, 2000. 520 с.
5. **Dumer I., Micciomcio D., Sudan M.** Hardness of Approximating the Minimum Distance of a Linear Code // 2000 IEEE International Symposium on Information Theory. 2003. Vol. 49. P. 22–37.
6. **Boston N.** Bounding Minimal Distances of Cyclic Codes Using Algebraic Geometry // Electronic Notes in Discrete Mathematics. 2001. Vol. 6. Iss. 5. P. 384–386.

7. **Kaida T. A., Zeng A.** Note on the Rank Bounded Distance and Its Algorithms for Cyclic Codes // Pure and Applied Mathematics Journal. 2015. Vol. 4. Iss. 2–1. P. 36–41.
8. **Кларк Д., Кейн Д.** Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи. М.: Радио и связь, 1987. 388 с.
9. **Никитин Г. И.** Помехоустойчивые циклические коды. СПб.: Санкт-Петербургский ГУ аэрокосмического приборостроения, 2003. 33 с.

Transmission Reliability of Transactions in Mechatronic Systems: Choice of Triplets for Noiseproof Code

A. V. Gulay, altaj@tut.by✉, **V. M. Zaitsev**, is@bntu.by,
Belorussian national technical university, Minsk, 220013, Belarus

Corresponding author: **Gulay Anatoliy V.**, PhD, Associate Professor, Chief of Department, Belorussian national technical university, Minsk, 220013, Belarus, e-mail: altaj@tut.by

Received on March 02, 2015

Accepted on August 11, 2015

In order to provide the preset authenticity level of transfer of transactions by channels, for example, in mechatronic systems noise-resistant coding is required. Improvement of transfer authenticity is attained owing to the rational selection of triplets of the noise-resistant code by allowing to minimize the actual volume of transactions. The technology of selecting the said triplets presented in the work is based on comparison of functions which characterize probability of errors formation in transmission channels. One of the said functions includes probability W of errors formation having certain multiplicity in each code block when this is transmitted by the channel with the known speed of occurrence of bit errors. Another function is the limit allowed probability L of available residual errors in the code block when the required authenticity is achieved due to correction by means of the code of bit errors of certain multiplicity. Rational selection of noise-resistant code triplets with the aim of improvement of authenticity of transactions transfer is determined by the introduced criteria term $W \leq L$. With the use of the proposed method of selection of the noise-resistant code triplets an assessment has been fulfilled for provision of the field of providing the limit allowed probability of available residual errors in code blocks and the requires authenticity of transactions transfer. The obtained results made it possible to form possible solutions of selecting the fixed triplets of the noise-resistant code depending on speed of bit errors in the transaction channel, authentic transfer of the transaction block, as well as its allowed total volume.

Keywords: mechatronic system; transmission of transactions; noiseproof code, transmission reliability

For citation:

Gulay A. V., Zaitsev V. M. Transmission Reliability of Transactions in Mechatronic Systems: Choice of Triplets for Noiseproof Code, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 26–31.

DOI: 10.17587/mau/17.26-31

References

1. **Fedotov A. V.** *Ispol'zovanie metodov teorii avtomaticheskogo upravleniya pri razrabotke mehatronnykh sistem* (Use of Automatic Control Theory Methods While Developing Mechatronic Systems), Omsk, Publishing House of Omsk State Technical University, 2007. 84 p. (in Russian).
2. **Harin Ju. S., Bernik V. I., Matveev G. V., Agievich S. V.** *Matematicheskie i komp'yuternye osnovy kriptologii* (Mathematical and Computer Fundamentals of Cryptology), Minsk, Novoe znanie, 2003. 382 p. (in Russian).
3. **Smit S.** *Cifrovaya obrabotka signalov* (Digital Signal Processing), Moscow, DodJeka—XXI, 2008. 720 p. (in Russian) A Practical Guide for Engineers and Scientists. California, San-Diego, California Technical Publishing. 643 p.

4. **Feer K.** *Besprovodnaya cifrovaya svyaz'* (Wireless Digital Communications. Modulation and Spread Spectrum Applications), Moscow, Radio i svyaz', 2000. 520 p. Modulation and Spread Spectrum Applications. NY, Prentice Hall PTR. 544 p.
5. **Dumer I., Micciomcio D., Sudan M.** Hardness of Approximating the Minimum Distance of a Linear Code, *2000 IEEE International Symposium on Information Theory*, 2003, vol. 49, pp. 22–37.
6. **Boston N.** Bounding Minimal Distances of Cyclic Codes Using Algebraic Geometry, *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 2001, vol. 6, iss. 5, pp. 384–386.
7. **Kaida T. A., Zeng A.** Note on the Rank Bounded Distance and Its Algorithms for Cyclic Codes, *Pure and Applied Mathematics Journal*, 2015, vol. 4, iss. 2–1, pp. 36–41.
8. **Kларк Д., Кейн Д.** *Kodirovanie s ispravleniem oshibok v sistemah cifrovoy svyazi* (Error-Correction Coding for Digital Communications), Moscow, Radio i svyaz', 1987, 388 p. (Clark, G. C & Cain, J. B. (1981) Error-Correction Coding for Digital Communications. Springer. 432 p.)
9. **Nikitin G. I.** *Pomehoustojchivye ciklicheskie kody* (The error-detecting cyclic codes), Saint Petersburg, Publishing House of Saint Petersburg State university of aerospace instrumentation, 2003, 33 p. (in Russian).

В. С. Мелентьев, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, vs_mel@mail.ru,
В. И. Батищев, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, vib@list.ru,
Ю. М. Иванов, ст. науч. сотр., fuego27@rambler.ru
Самарский государственный технический университет, Самара

Анализ и совершенствование методов и систем измерения частоты гармонических сигналов¹

Коротко рассмотрены проблемы, возникающие при измерении частоты сигнала. Для решения задачи сокращения времени измерения в узком диапазоне частот входного сигнала предложено использовать априорную информацию о модели измерительного сигнала. Рассмотрен новый метод измерения частоты гармонического сигнала, основанный на формировании дополнительного напряжения, сдвинутого относительно входного на произвольный угол, и использовании мгновенных значений входного и дополнительного сигналов для определения частоты. В отличие от известных, метод позволяет определять частоту за время, значительно меньшее периода входного сигнала. Приведена структурная схема средства измерения, реализующего метод. Проведен анализ погрешности, обусловленной отклонением реального периодического сигнала от гармонической модели. Показано, что значение погрешности в значительной мере определяется не только гармоническим составом реального сигнала, но и длительностью образцового интервала времени и угла сдвига дополнительного сигнала относительно входного. Приведены результаты анализа погрешности, возникающей из-за неидеальности фазосдвигающего блока, предназначенного для формирования дополнительного сигнала. Рассмотрены вопросы уменьшения погрешностей за счет изменения параметров измерительного процесса.

Ключевые слова: частота, гармоническая модель, мгновенные значения сигналов, средство измерения, фазосдвигающий блок, погрешность

Введение

Для решения задач испытаний и контроля энергообъектов и электротехнического оборудования и автоматизированного управления технологическими процессами требуется создание методов и средств измерения параметров электрических сигналов переменного тока, включая частоту. Кроме того, для повышения точности измерений некоторые физические величины предварительно преобразуют в сигналы, пропорциональные частоте [1].

Современные средства измерения (СИ) частоты звукового диапазона основаны, в основном, на преобразовании частоты в интервалы времени, длительность которых затем определяют цифровыми методами. Наиболее распространенными являются метод последовательного счета, а также методы, обеспечивающие повышение точности измерения: метод задержанных совпадений и нониусный метод [2, 3]. Использование данных методов принципиально не может обеспечить время измерения менее периода входного сигнала.

Поэтому задача создания методов и СИ частоты, обеспечивающих высокое быстродействие и точность, является актуальной. Особенно остро стоит проблема сокращения времени измерения частоты при контроле параметров датчиков положения и перемещения с низкочастотным выходным сигналом, а также при определении скорости изменения частоты.

Большинство современных исследований посвящены определению основной частоты [4] сложных периодических сигналов, а также сигналов, искаженных шумами [5], путем обработки дис-

кретных значений сигналов и реализации процедуры на эффективных сигнальных процессорах, что также не обеспечивает высокого быстродействия даже в звуковом диапазоне частот.

Одним из путей решения проблемы сокращения времени измерения в узком диапазоне частот входного сигнала является привлечение априорной информации о модели объекта или измерительного сигнала для определения его параметров. При этом в качестве модели периодического сигнала при определенных условиях часто выбирают гармоническую модель, проводя последующую оценку погрешности, обусловленной несоответствием модели виду реального сигнала [6].

В настоящее время развивается направление, связанное с разработкой методов и средств измерения частоты по отдельным мгновенным значениям гармонических сигналов, не связанным с периодом входного сигнала. Это предполагает два основных способа разделения мгновенных значений: во времени и в пространстве [7].

Второй способ требует формирования дополнительных сигналов напряжения, сдвинутых по фазе относительно входных, и обеспечивает, в общем случае, сокращение времени измерения.

Если в качестве дополнительных сигналов использовать ортогональные составляющие входных [8, 9], то это неизбежно приведет к частотной погрешности фазосдвигающих блоков (ФСБ), осуществляющих формирование дополнительных сигналов. При изменении частоты угол сдвига фазы ФСБ может отличаться от 90° .

Этот недостаток устраняется в методах измерения частоты [10, 11], в которых используется формирование дополнительного сигнала, сдвинутого относи-

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 13-08-00173-а).

тельно входного на произвольный (в общем случае) угол $\Delta\alpha$. Однако при реализации данных методов определяются переходы сигналов через ноль. Это значительно увеличивает время измерения, поскольку момент начала измерения и момент перехода сигнала через ноль в общем случае не совпадают.

В статье рассматривается новый метод и реализующее его СИ, обеспечивающие начало измерения в произвольный момент времени.

Метод измерения частоты на основе использования мгновенных значений входного и дополнительных сигналов

Метод основан на формировании двух дополнительных сигналов напряжения, сдвинутых по фазе относительно входного соответственно на углы $\Delta\alpha$ и $2\Delta\alpha$ в сторону опережения и использовании мгновенных значений как входного, так и дополнительных сигналов для определения частоты. В соответствии с методом в произвольный момент времени измеряют первые мгновенные значения входного и дополнительных напряжений. Через образцовый интервал времени Δt измеряют вторые мгновенные значения входного сигнала и дополнительного сигнала напряжения, сдвинутого относительно входного на $\Delta\alpha$, и определяют частоту по измеренным мгновенным значениям.

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рис. 1.

Для входного гармонического напряжения $u_1(t) = U_m \sin \omega t$ дополнительные сигналы принимают вид

$$u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta\alpha) \text{ и } u_3(t) = U_m \sin(\omega t + 2\Delta\alpha).$$

В произвольный момент времени t_1 выражения для мгновенных значений сигналов имеют вид

$$U_{11} = U_m \sin \alpha_1; \quad U_{21} = U_m \sin(\alpha_1 + \Delta\alpha); \\ U_{31} = U_m \sin(\alpha_1 + 2\Delta\alpha),$$

где U_m — амплитудное значение напряжения; α_1 — начальная фаза напряжения в момент времени t_1 ; ω — угловая частота.

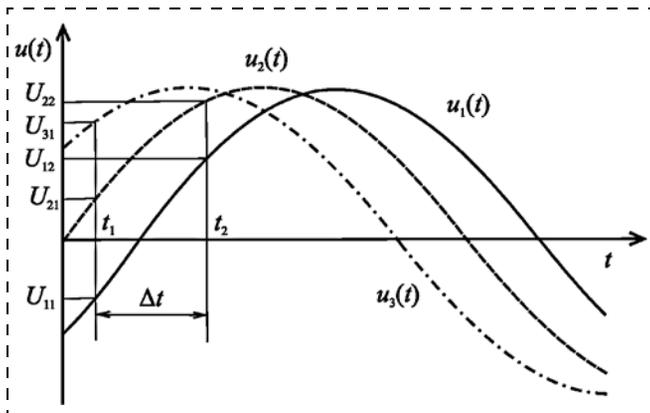


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

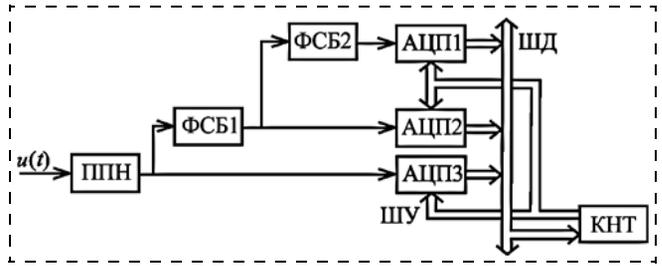


Рис. 2. Схема СИ, реализующего метод

Через интервал времени Δt мгновенные значения сигналов примут вид

$$U_{12} = U_m \sin(\alpha_1 + \omega \Delta t); \quad U_{22} = U_m \sin(\alpha_1 + \Delta\alpha + \omega \Delta t).$$

Используя мгновенные значения, можно определить искомую частоту:

$$f = \frac{1}{2\pi \Delta t} \arcsin \frac{(U_{21} U_{12} - U_{11} U_{22}) \sqrt{U_{21}^2 - (U_{31} + U_{11})^2}}{2 U_{21} (U_{21}^2 - U_{31} U_{11})}. \quad (1)$$

Схема СИ, реализующего метод, приведена на рис. 2.

СИ содержит: первичный преобразователь напряжения ППН, два фазосдвигающих блока ФСБ1 и ФСБ2, осуществляющих сдвиг сигналов на угол $\Delta\alpha$, три аналого-цифровых преобразователя АЦП1, АЦП2, АЦП3, контроллер КНТ, шины управления ШУ и данных ШД.

Оценка погрешности, обусловленной отклонением реального сигнала от гармонической модели

Рассматриваемый метод предназначен для определения частоты гармонических сигналов. Проведем оценку методической погрешности, обусловленной отклонением реального сигнала от гармонической модели. Для этого используем предложенную в работе [6] методику оценки погрешности результата измерения как функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностью, соответствующей отклонению модели от реального сигнала.

Предельное значение абсолютной погрешности измерения частоты равно

$$\Delta f = \left[\left| \frac{\partial f}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial U_{12}} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial U_{22}} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial U_{31}} \right| \right] \Delta U_{\max}, \quad (2)$$

где $\Delta U_{\max} = U_{1m} \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}$ — предельная абсолютная погрешность аргументов, соответствующая наибольшему отклонению модели от реального сигнала;

$h_{uk} = \frac{U_{km}}{U_{1m}}$ — коэффициент k -й гармоники напря-

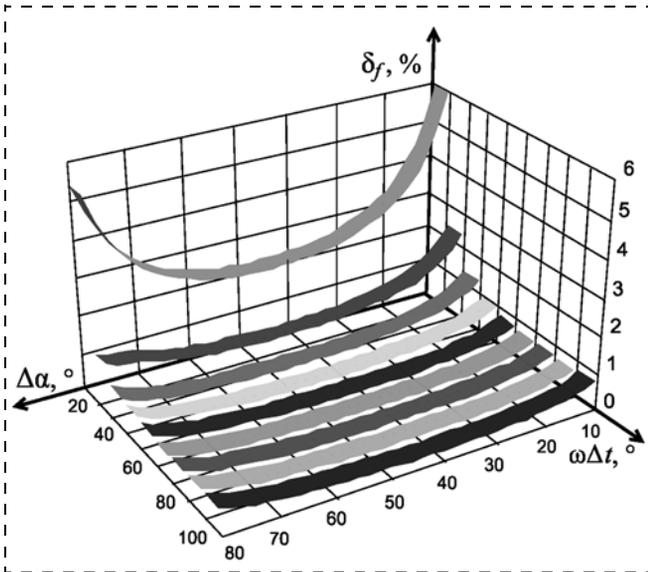


Рис. 3. Графики зависимости δ_f от $\omega\Delta t$ и $\Delta\alpha$ при $\alpha_1 = 0^\circ$

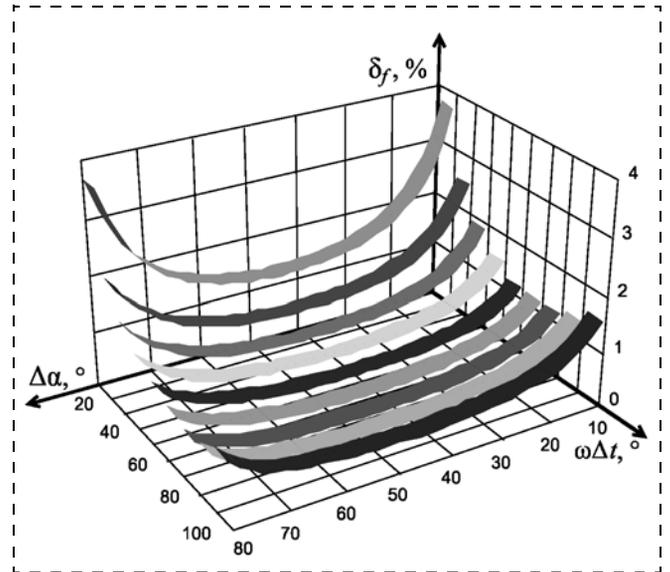


Рис. 4. Графики зависимости δ_f от $\omega\Delta t$ и $\Delta\alpha$ при $\alpha_1 = 45^\circ$

жения; U_{1m} — амплитуда первой гармоники напряжения; U_{km} — амплитуда k -й гармоники напряжения.

Относительная погрешность измерения частоты в соответствии с соотношениями (1) и (2) примет вид

$$\delta_f = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{\omega\Delta t \sin^2 \Delta\alpha |\sin(\alpha_1 + \Delta\alpha) \cos \omega\Delta t|} \times \{ |\sin \Delta\alpha \cos \omega\Delta t + \cos(2\alpha_1 + 2\Delta\alpha) \sin(\omega\Delta t - \Delta\alpha)| + 2|\sin \Delta\alpha \sin(\alpha_1 + \Delta\alpha)| [|\sin(\alpha_1 + \Delta\alpha)| + |\sin \alpha_1|] + |\sin \omega\Delta t \cos(2\alpha_1 + \Delta\alpha)| \}. \quad (3)$$

Анализ выражения (3) показывает зависимость погрешности от гармонического состава сигнала, угла сдвига фазы ФСБ $\Delta\alpha$, образцового интервала времени Δt и начальной фазы входного сигнала α_1 .

На рис. 3 и 4 представлены графики зависимости относительной погрешности измерения частоты от $\omega\Delta t$ и $\Delta\alpha$ согласно выражению (3) при наличии в сигнале 1-й и 3-й гармоник с коэффициентом $h_{u3} = 0,2\%$ для $\alpha_1 = 0^\circ$ и $\alpha_1 = 45^\circ$.

Из рис. 3 и 4 следует, что погрешность измерения частоты существенно зависит от параметров измерительного процесса. При этом погрешность может быть существенно уменьшена за счет соответствующего выбора $\omega\Delta t$ и $\Delta\alpha$.

Оценка погрешности, обусловленной неидеальностью фазосдвигающего блока

Одним из основных факторов, ограничивающих точность СИ, использующих формирование дополнительных сигналов, является погрешность по напряжению (погрешность по модулю) ФСБ. Наличие данного вида погрешности приводит к различию амплитуд входного и дополнительного сигналов.

В случае, если амплитудное значение сигнала на выходе ФСБ отличается от амплитуды входного

сигнала на величину ΔU , мгновенные значения дополнительного напряжения примут вид

$$U'_{21} = (U_m + \Delta U) \sin(\alpha_1 + \Delta\alpha);$$

$$U'_{31} = (U_m + \Delta U) \sin(\alpha_1 + 2\Delta\alpha);$$

$$U'_{22} = (U_m + \Delta U) \sin(\alpha_1 + \Delta\alpha + \omega\Delta t).$$

Проведем оценку влияния погрешности ФСБ на погрешность результата измерения частоты, используя методику, предложенную в работе [6], рассматривая частоту как функцию, аргументы которой (мгновенные значения сигналов) заданы приближенно с погрешностью, соответствующей отклонению мгновенных значений дополнительного напряжения на величину ΔU .

Если считать, что мгновенные значения входного напряжения измерены без погрешности, а погрешности по модулю обоих ФСБ равны, то можно определить предельное значение абсолютной погрешности измерения частоты:

$$\Delta f_M = \left[\left| \frac{\partial f}{\partial U'_{21}} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial U'_{22}} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial U'_{31}} \right| \right] \Delta U. \quad (4)$$

Используя соотношение (1), (4), можно найти относительную погрешность определения частоты:

$$\delta_{f_M} = \frac{h_m}{\omega\Delta t \sin^2 \Delta\alpha |\sin(\alpha_1 + \Delta\alpha) \cos \omega\Delta t|} \times \{ 2|\sin(\alpha_1 + \Delta\alpha) \sin \alpha_1 \sin(\Delta\alpha - \omega\Delta t) + \cos(\alpha_1 + 2\Delta\alpha) \sin \omega\Delta t \cos \alpha_1 + 2|\sin \Delta\alpha \sin(\alpha_1 + \Delta\alpha) \sin \alpha_1| + |\sin \omega\Delta t \cos(2\alpha_1 + \Delta\alpha)| \}, \quad (5)$$

$$\text{где } h_m = \frac{\Delta U}{U_m}.$$

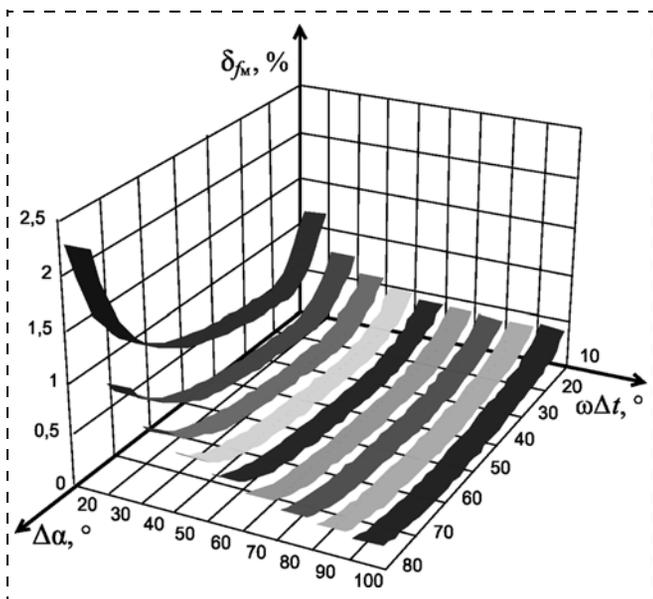


Рис. 5. Графики зависимости δ_{f_m} от $\omega\Delta t$ и $\Delta\alpha$ при $\alpha_1 = 45^\circ$

Анализ выражения (5) показывает, что погрешность измерения частоты пропорциональна h_m . Однако погрешность зависит не только от погрешности по модулю, вносимой ФСБ, но и от угла сдвига фазы ФСБ, интервала времени Δt и начальной фазы входного сигнала α_1 .

На рис. 5 представлены графики зависимости относительной погрешности измерения частоты от $\omega\Delta t$ и $\Delta\alpha$ согласно (5) при $h_m = 0,05$ для $\alpha_1 = 45^\circ$.

Анализ рис. 5 показывает, что погрешность измерения частоты можно существенно снизить за счет оптимального выбора $\omega\Delta t$ и $\Delta\alpha$.

Очевидно, что отличие углов сдвига фаз первого и второго ФСБ также может привести к погрешности измерения частоты.

Заключение

Разработанный метод и реализующее его СИ позволяют начинать измерение в произвольный момент времени, что обеспечивает сокращение времени определения частоты.

Проведенная оценка погрешности, обусловленной неидеальностью фазосдвигающих блоков, осуществляющих формирование дополнительных сигналов, обнаружила значительное влияние данного вида погрешности на результирующую погрешность определения частоты.

Полученные в работе результаты позволяют выбирать оптимальные значения углов сдвига фаз ФСБ, а также параметры измерительного процесса в соответствии с требованиями по точности и времени измерения.

Список литературы

1. Ратхор Т. С. Цифровые измерения. АЦП/ЦАП. М.: Техносфера, 2006.
2. Зайцев С. Цифровые методы время-частотных измерений // Современная электроника. 2009. № 6. С. 20–23.
3. Petrovic P., Marjanovic S., Stevanovic M. New algorithm for measuring 50/60 Hz AC values based on the usage of slow A/D converters // IEEE Trans, on Instrum. and Meas. 2000. Vol. 49, Iss. 1. P. 166–171.
4. Belega D., Dallet D., Petri D. Accuracy of the Normalized Frequency Estimation of a Discrete-Time Sine-Wave by the Energy-Based Method // IEEE Trans, on Instrum. and Meas. 2012. Vol. 61, Iss. 1. P. 111–121.
5. Zhu L. M., Song X. M., Li H. X., Ding H. High accuracy estimation of multi-frequency signal parameters by improved phase linear regression // Signal Processing. 2007. Vol. 87, Iss. 5. P. 1066–1077.
6. Мелентьев В. С., Батищев В. И. Аппроксимационные методы и системы измерения и контроля параметров периодических сигналов. М: ФИЗМАТЛИТ, 2011.
7. А. с. 1185260 (СССР). Устройство определения частоты переменного напряжения / А.-С. С. Саухатас, Я. Я. Приедите (СССР). Опубл. 30.10.88, Бюл. № 40.
8. Мелентьев В. С., Силицын А. Е., Миронов А. А. Методы измерения частоты на основе сравнения гармонических сигналов, сдвинутых в пространстве и разделенных во времени // Информационно-измерительные и управляющие системы. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. № 1 (8). С. 75–79.
9. Мелентьев В. С., Иванов Ю. М., Миронов А. А. Исследование метода измерения частоты гармонических сигналов // Ползуновский вестник. 2013. № 2. С. 198–201.
10. Мелентьев В. С., Ярославкина Е. Е., Силицын А. Е., Муратова В. В. Исследование методов измерения частоты выходных сигналов датчиков // Южно-Сибирский научный вестник. 2014. № 1 (5). С. 54–56.
11. Мелентьев В. С., Иванов Ю. М., Муратова В. В. Исследование метода измерения частоты гармонических сигналов по мгновенным значениям сигналов // Южно-Сибирский научный вестник. 2014. № 2 (6). С. 32–34.

Analysis and Improvement of the Methods and Systems for Measurement of the Frequencies of the Harmonic Signals

V. S. Melentiev, vs_mel@mail.ru✉, V. I. Batishchev, vib@list.ru, Yu. M. Ivanov, fuego27@rambler.ru, Samara State Technical University, Samara, 443100, Russian Federation

Corresponding author: Melentiev Vladimir S., D. Sc. Head of Department, Samara State Technical University, Samara, 443100, Russian Federation, e-mail: vs_mel@mail.ru

Received on July 08, 2015

Accepted on July 15, 2015

The article presents briefly the problems involved in measurement of the frequency of a signal. For solving the task of reduction of the time in the narrow frequency range of a signal input a priori information is used about the model of the measuring signal, a new method for measurement of the frequency of a harmonic signal. The method is based on the formation of the secondary voltage shifted in relation to the input at an arbitrary angle and on the use of the instantaneous and additional input signals for determination of the frequency. In contrast to the already known methods it enables us to define the frequency in the period of time considerably less than the period of the input signal. A block diagram of the measurement tools which implements the method is presented. An analysis was done of the errors due to deviation of the real heartbeat of the harmonic model. It was demonstrated that the error value was largely determined by not only the harmonic structure of a real signal, but also by the duration of exemplary time interval and the angle of the shift of the additional signal in relation to the input one. The article presents the results of the analysis of the error arising due to imperfect phase-shifting block not intended for formation of an additional signal. Opportunities for reduction of the errors by modifying the parameters of the measuring process were considered. The obtained results allow us to evaluate a possibility of using the method and means of its implementation, depending on the spectral composition of the input signal and requirements for the measurement accuracy. The analysis showed that the most appropriate areas for application of the method were: control of the parameters of the position and moving sensors with a low-frequency output, as well as determination of the rate of the frequency change.

Keywords: frequency, harmonic model, instantaneous values, means of measurement, signals of phase-shifting units, error

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 13-08-00173-a.

For citation:

Melentiev V. S., Batishchev V. I., Ivanov Yu. M. Analysis and Improvement of the Methods and Systems for Measurement of the Frequencies of the Harmonic Signals, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 32–36.

DOI: 10.17587/mau/17.32-36

References

1. Rathor T. S. *Cifrovye izmereniya*. ACP/CAP (Digital measurement. ADC/DAC), Moscow, Tehnosfera, 2006 (in Russian).
2. Zajcev S. *Cifrovye metody vremya-chastotnyh izmerenij* (Digital methods of time-frequency measurements), *Sovremennaja jelektronika*, 2009, no. 6, pp. 20–23 (in Russian).
3. Petrovic P., Marjanovic S., Stevanovic M. New algorithm for measuring 50/60 Hz AC values based on the usage of slow A/D converters, *IEEE Trans, on Instrum. and Meas*, 2000, vol. 49, iss. 1, pp. 166–171.
4. Belega D., Dallet D., Petri D. Accuracy of the Normalized Frequency Estimation of a Discrete-Time Sine-Wave by the Energy-Based Method, *IEEE Trans, on Instrum. and Meas*, 2012, vol. 61, iss. 1, pp. 111–121.
5. Zhu L. M., Song X. M., Li H. X., Ding H. High accuracy estimation of multi-frequency signal parameters by improved phase linear regression, *Signal Processing*, 2007, vol. 87, iss. 5, pp. 1066–1077.
6. Melent'ev V. S., Batishchev V. I. *Approximacionnye metody i sistemy izmereniya i kontrolja parametrov periodicheskikh signalov* (Ap-

proximation methods and systems for measuring and monitoring the parameters of periodic signals), Moscow, FIZMATLIT, 2011 (in Russian).

7. Sauhatas A.-S. S., Priedite Ja. Ja. A. s. 1185260 (USSR). *Ustrojstvo opredelenija chastoty peremennogo napryazhenija* (The device for determining the frequency of alternating voltage), Opubl. 30.10.88, Bjul. № 40 (in Russian).

8. Melent'ev V. S., Sinicyn A. E., Mironov A. A. *Metody izmereniya chastoty na osnove sravnenija garmonicheskikh signalov, sdvynutyh v prostranstve i razdelennyh vo vremeni* (Method for measuring the frequency based on the comparison of harmonic signals which are shifted in space and separated in time), *Informacionno-Izmeritel'nye i Upravljajushhie Sistemy*, Samara, Publishing house of Samar. gos. tehn. un-t, 2013, no. 1 (8), pp. 75–79 (in Russian).

9. Melent'ev V. S., Ivanov Ju. M., Mironov A. A. *Issledovanie metoda izmereniya chastoty garmonicheskikh signalov* (The research of the method for measuring the frequency of harmonic signals), *Polzunovskij Vestnik*, 2013, no. 2, pp. 198–201 (in Russian).

10. Melent'ev V. S., Jaroslavkina E. E., Sinicyn A. E., Muratova V. V. *Issledovanie metodov izmereniya chastoty vyhodnyh signalov datchikov* (The research of the method for measuring the frequency of the sensor output signals), *Juzhno-Sibirskij Nauchnyj Vestnik*, 2014, no. 1 (5), pp. 54–56 (in Russian).

11. Melent'ev V. S., Ivanov Ju. M., Muratova V. V. *Issledovanie metoda izmereniya chastoty garmonicheskikh signalov po mgnovennym znachenijam signalov* (The research of the method for measuring the frequency of harmonic signals on instantaneous values of signals), *Juzhno-Sibirskij Nauchnyj Vestnik*, 2014, no. 2 (6), pp. 32–34 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ

11–14 марта 2016 г.

на базе Алтайского государственного университета состоится

VI Международная научно-практическая конференция

"МНОГОЯДЕРНЫЕ ПРОЦЕССОРЫ, ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ, ПЛИС, СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ" (МППОС–2016)

Тематические направления конференции

- Многоядерные процессоры, ПЛИС и обработка сигналов
- Параллельное программирование и моделирование явлений и процессов с использованием параллельных вычислений
- Робототехника и автоматизация технологических процессов и научного эксперимента

КОНТАКТНЫЕ АДРЕСА И ТЕЛЕФОНЫ:

Тел.: каф. ВТиЭ АлтГУ: 8-(3852) 38-07-51

Иордан Владимир Иванович, e-mail: iordan@phys.asu.ru , тел.: +7-960-937-89-00

Калачев Александр Викторович, e-mail: kalachev@phys.asu.ru , тел.: +7-913-027-84-06

Белозерских Василий Вениаминович, e-mail: bww@phys.asu.ru , тел.: +7-903-947-71-15

И. В. Майоров, руководитель отдела математического моделирования, imayorov@smartsolutions-123.ru, НПК "Разумные решения", Самара

Применение мультиагентной платформы для создания интеллектуальных систем управления ресурсами в реальном времени¹

Рассматривается задача построения и применения мультиагентной платформы для создания интеллектуальных систем управления ресурсами в реальном времени. Предлагается метод многокритериального планирования производственных и транспортных ресурсов на основе модифицированной модели сети потребностей и возможностей (ПВ-сети) предприятий, в котором проводится поочередное улучшение различных критериев в зависимости от ситуации, отражаемой состоянием ресурсов и потоком входящих событий. Агенты ПВ-сети обладают собственными целевыми установками, но способны идти на уступки и компромиссы для достижения интереса системы в целом. Экспериментально показана возможность решения сложных задач управления ресурсами в реальном времени, которые не решаются или плохо решаются классическими методами и известными эвристиками. Разработанный метод и платформа применены при создании промышленных систем управления ресурсами в различных предметных областях, обеспечивая 20...40 %-ное повышение эффективности предприятий.

Ключевые слова: мультиагентная платформа, поддержка принятия решений, адаптивное планирование, мультиагентная технология, планирование в реальном времени, промышленные применения

Введение

Современные автоматизированные системы управления ресурсами предприятий на практике часто сводятся лишь к учетному контуру, обеспечивая в лучшем случае укрупненное годовое или квартальное планирование.

Одна из главных проблем состоит в том, что традиционные методы и средства планирования ориентированы на использование классических комбинаторных подходов, в которых все заказы и ресурсы считаются известными заранее, игнорируются индивидуальные особенности заказов и ресурсов, имеется ряд вычислительных трудностей и т. д. [1].

Действительно, решение классических задач планирования ресурсов (известных как NP-трудные задачи) обычно формулируется как пакетный процесс, в котором все заказы и ресурсы не изменяются в процессе работы и удовлетворяют ряду ограничений. В этом случае известные на рынке традиционные системы планирования реализуют подходы линейного или динамического программирования, программирования с учетом ограничений и других методов, основанных на комбинаторном поиске вариантов [2], которые на практике быстро оказываются не применимы с ростом размерности данных.

Для уменьшения вычислительной сложности комбинаторного поиска в последние годы были предложены разнообразные методы с использованием эвристик и метаэвристик [3], которые при некоторых условиях позволяют получать приемлемые решения за разумное время за счет сокраще-

ния вариантов комбинаторного поиска, например, "жадные" локальные методы поиска, методы имитации отжига, табу поиска, генетические и муравьиные алгоритмы и др.

Однако указанные методы в основном используют также пакетную обработку и с трудом расширяются дополнительными целевыми критериями, не позволяя учитывать множественные факторы реальной жизни, которые могут задаваться не только формулами и неравенствами, но также таблицами и графиками и даже алгоритмами.

Кроме того, эти методы весьма сложны в использовании, не обеспечивая при этом требуемую оперативность, гибкость и эффективность в интерактивной доработке планов, что всегда требуется в практических приложениях.

Поэтому в последнее время все большее развитие получают мультиагентные технологии, открывающие новые возможности для распределенного построения сложных самоорганизующихся расписаний, построенных на переговорах и балансе интересов всех участников [4].

Вместе с тем, создание интеллектуальных систем управления ресурсами на основе мультиагентных технологий представляет собой сложную задачу, в которой требуется обеспечить параллельное и асинхронное взаимодействие агентов, обладающих собственными целями, но при этом согласованно работающих на общую цель системы, поддерживая переговоры и взаимные уступки при разрешении конфликтов.

В связи с этим в данной работе рассматривается реализация мультиагентной платформы для адаптивного планирования ресурсов в реальном времени, позволяющая существенно, в 3...5 раз, ускорить

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ.

разработки прикладных интеллектуальных систем управления ресурсами.

Обсуждаются применение платформы для решения прикладных задач и преимущества разработанного подхода, а также перспективы его развития.

1. Мультиагентный подход к динамическому планированию

В отличие от классических больших, централизованных, неделимых и последовательных программ, мультиагентные системы (МАС) построены в виде распределенных групп небольших автономных программных объектов, работающих асинхронно, но согласованно, для получения результата.

В последние годы мультиагентные технологии все чаще находят свое применение для решения задач планирования и оптимизации ресурсов, в связи с чем был разработан ряд новых методов и средств, например, роевая оптимизация, гибридные методы на основе искусственной иммунной системы и оптимизация методом роя частиц и др. [5—7].

В развиваемом нами подходе используется концепция сетей потребностей и возможностей (ПВ-сети) и метод сопряженных взаимодействий для управления ресурсами предприятий в реальном времени, реализуемый на основе виртуального рынка [8—9], которые обеспечивают большую оперативность, гибкость и эффективность в принятии управленческих решений при решении логистических задач в различных областях применения.

Задача агентов потребностей — найти возможности (ресурсы) для удовлетворения потребностей, а задача агентов возможностей состоит в том, чтобы найти потребности для использования своих возможностей. В случае успешного поиска агенты могут заключать или пересматривать контракты на требуемые услуги на виртуальном рынке системы с выплатой бонусов в случае успешного их выполнения или штрафов в случае разрыва связей, а также компенсаций за ухудшение позиций при уступках в ходе переговоров.

В результате создаваемое расписание может рассматриваться как гибкая самоорганизующаяся ПВ-сеть, которая может без полной перестройки расписания быстро адаптироваться при появлении различных "внеплановых" событий, таких как появление нового крупного заказа или отзыв уже распределенного, недоступность ресурса и т. д.

Данный подход оказывается особенно эффективным в предметных областях, характеризующихся высокой неопределенностью и динамикой (турбулентностью) событий в среде предприятия.

2. Мультиагентная платформа

Для сокращения трудоемкости и ускорения процесса построения интеллектуальных систем управления ресурсами для различных применений была создана мультиагентная платформа, предоставляющая разработчикам набор типовых моделей, методов и средств разработки.

Программные агенты ПВ-сети в среде платформы имеют характеристики (атрибуты), связанные с

настройкой сети на данную предметную область, например, область производственного планирования, транспортной логистики или цепочек поставок. Кроме того, у агентов задаются целевые критерии (срок, стоимость, риск и др.) и функции удовлетворенности со значением от 0 до 1, описывающие их состояния по текущим значениям критериев. С каждым агентом связан счет в виртуальной валюте, с помощью которого в процессе переговоров они могут улучшать свои показатели. Отклонения показателей агентов от предполагаемых идеальных оцениваются с помощью штраф/бонусных функций, выраженных в виртуальных денежных единицах.

Итерационный процесс поиска решения останавливается при достижении консенсуса между агентами, при превышении числа итераций (заданного времени на решение задачи) или фиксации факта осцилляции решения в рамках заданного эpsilon-порога приближения.

Предложены принципы реализации мультиагентной платформы для управления ресурсами, которые приведены ниже.

1. Платформа предлагает готовые базовые классы агентов ПВ-сетей (заказов, ресурсов, продуктов, процессов и операций, потребностей и возможностей предприятия), которые могут быть доработаны разработчиком под требования предметной области.

2. Различные классы агентов задач, заявок, подзадач, операций и исполняющих ресурсов настраиваются путем применения формализованных правил из базы знаний системы, построенной на основе онтологии.

3. Онтология описывает концептуальные знания о данной предметной области в виде классов объектов и процессов, свойств, отношений и атрибутов, что позволяет записывать в этих терминах правила принятия решений агентами. Агенты различных классов имеют возможность зачитывать описания процессов из базы знаний и разворачивать их применение к каждой конкретной ситуации.

4. Основное содержание базы знаний связывается с процедурами (операциями), которые предстоит планировать для реализации заказов (в случае производства — это технологические процессы, в случае транспортировки — операции перемещения транспорта в точку погрузки, транспортировки грузов, остановки на питание, отдых и ночлег, разгрузки грузов, загрузки тары, заправки и техобслуживания, в случае офиса — это бизнес-процессы и т. д.).

5. При появлении нового заказа в виртуальном мире предприятия создается агент заказа, который находит и читает процесс своего исполнения в базе знаний, как бы обращаясь к общей для всех агентов библиотеке для консультации.

6. Под каждую операцию создается свой собственный агент, который получает требования от агента заказа о необходимых ему ресурсах, а также знания о том, кто находится "слева" и "справа" в цепочке действий для выполнения заказа (через онтологическое отношение "следования").

7. Каждый агент получает от своего родителя или соседа предложения и рекомендации по времени

начала и завершения операции и пытается найти нужный ему ресурс в сцене мира предприятия.

8. Если ресурс уже занят, то заказ уходит от конфликта и ищет себе временно первое ближайшее свободное место, или фиксируется конфликт, который разрешается сразу или на последующих стадиях работы агентов.

9. По мере планирования агенты сообщают родителю и соседям свои параметры, и тогда родитель фиксирует процесс завершения стадии планирования или пытается улучшить состояния отдельных плохо запланированных агентов, выделяя им больше виртуальных денег для компенсации ухудшений другим агентам.

10. Критерии оптимизации расписаний для каждого агента описываются многокомпонентными целевыми функциями удовлетворенности, определяемыми в онтологии предметной области (например, агент заказа хочет быть выполнен с высоким качеством, низкой ценой, в самый короткий срок и минимальным риском). Каждый критерий также определяет штрафные и бонусные функции агентов, связанные с удовлетворением или нарушением этого критерия: как дорого будут стоить агенту отклонения от текущего значения или сколько он сможет заработать при достижении данного значения целевой функции, что, фактически, определяет и более высокую эластичность по менее значимому критерию.

11. Каждый отдельный критерий с помощью весовых коэффициентов может быть включен в свертку общих критериев для каждого агента.

12. Агенты заказов и ресурсы создают расписание как сцену виртуального мира, отражающую ситуацию в реальном мире. Каждый агент преследует свою собственную цель — получить как можно больше виртуальной прибыли, зависящей от положения его подзадач и операций в расписании и от соотношения затрат и дохода в каждый момент времени, повысив, тем самым, свою удовлетворенность.

13. Переговоры и другое взаимодействие агентов осуществляется путем отправки и приема сообщений, с помощью которых изменяются переменные, описывающие внутреннее динамическое состояние агентов. Улучшения состояний агентов приводят к улучшению динамического плана в целом. Виртуальные счета агентов позволяют изменять состояния на более выгодные, компенсируя ухудшения других за дополнительные виртуальные деньги.

14. Динамическое выравнивание отдельных групп показателей планирования проводится при сравнении компонентов критериев со средними по группе агентов и осуществляется в итерационном алгоритме на основе взаимовыгодного обмена виртуальных денег на состояние показателей.

15. Процессы планирования работают в две стадии — бесконфликтного и проактивного планирования. Бесконфликтное планирование основано на быстром включении очередной работы (заявки) в открытые слоты времени ресурсов, без возможного выявления и разрешения конфликтов. Проактивная стадия характеризуется разрешением конфликтов с многократным перепланированием ресурсов с уче-

том критериев, улучшения которых инициируются использованием виртуальных денежных средств. Процессы улучшений продолжаются до тех пор, пока не достигнут критерий останова — достигнут заданный коридор изменений, исчерпан предел итераций, исчерпаны денежные средства, когда ни один агент не может больше улучшить ситуацию (фиксируется динамический останов).

16. Проактивная стадия процесса улучшений позволяет в дальнейшем динамически приспосабливаться к различным внешним воздействиям на мультиагентную систему.

17. Глубина перепланирований для избежания глобальных перестроек расписаний.

18. Применение виртуальных денег в самоорганизующейся системе позволяет управлять изменениями, например, стимулировать изменения показателей планирования в заданном направлении.

Архитектура платформы включает следующие компоненты: редактор начальной сцены, генератор событий, очередь событий для основных классов событий, мультиагентный мир, построенный в виде виртуального рынка, базовые классы агентов, агенты поддержки спроса и предложения, визуальные компоненты для редактирования настроек агентов и визуализации результатов, импорт и экспорт данных, ведение журнала и отслеживание сообщений и финансовых транзакций агентов и некоторые другие специальные компоненты.

Эти компоненты могут быть адаптированы для новых предметных областей и приложений.

Возможности базового интерфейса пользователя мультиагентной платформы дают возможность конечным пользователям указывать начальную сцену (состояние) ресурсов, формировать последовательность событий вручную или автоматически или загружать ее из внешних файлов, создавать индивидуальные настройки для всех запросов и ресурсов, запускать моделирование с различными параметрами, визуализировать процессы переговоров и роста удовлетворенности агентов и результаты экспериментов.

Могут быть экспортированы для дальнейшего анализа журналы переговоров агентов с детализацией сообщений, журнал принятия решений и журнал финансовых транзакций, описывающий оборот виртуальных денег в системе.

3. Применения мультиагентной платформы

Разработанная платформа была применена в создании МАС для построения расписания полетов и грузопотока Международной космической станции. Проект выполнялся по заказу Ракетно-космической корпорации "Энергия" и был направлен на решение задачи построения программы полета и планирования грузопотока Российского сегмента Международной космической станции [10]. Система обеспечивает интерактивную поддержку разработки плана полетов и доставки грузов и учитывает множество настроек и ограничений, например, различные типы космических кораблей и модулей МКС, число космонавтов, расход топлива, минимальный

интервал времени между операциями стыковок и др. Эффект от внедрения системы включает сокращение трудоемкости при планировании размещения грузов: до 544 ч для корабля "Прогресс" и до 320 ч для корабля "Союз" в год. Автоматическая проверка на дубликаты списков утилизируемых грузов от Центра управления полетами экономит около 312 ч в год. Экономия при расчетах балансов продовольствия, воды, топлива и времени экипажа — от 10 до 15 % по каждому модулю, что в общей сложности составляет 270 ч в год.

Применение мультиагентной платформы при создании распределенной интеллектуальной системы управления железнодорожными перевозками Smart Railways в реальном времени [11] по заказу Российских железных дорог (РЖД) привело к снижению времени построения полного расписания до 45 мин, времени реакции на события — до 30 с. Выполняются все основные требования безопасности (интервалы между поездами, отсутствие поездов с шебенкой на встречной полосе и т. д.) — на 99 %, технические требования (время разгонов и торможения, выбор платформ, времена стоянок и др.) — на 97 %. Средняя задержка поездов на участках составила менее 8 % (до 30 поездов в конфликте), среднее время возврата к расписанию — в 1,5 раза меньше. Увеличилась производительность труда диспетчеров — более чем в 2 раза.

В мультиагентной системе Smart Factory управления цехами машиностроительного предприятия [12], также созданной на основе мультиагентной платформы, получено увеличение производительности и эффективности работы завода на 10...15 % за счет перехода к адаптивному распределению, планированию и контролю ресурсов цехов в реальном времени. Система обеспечивает: рост загрузки оборудования — на 20 %, рост выработки на 1 рабочего — на 30 %, соблюдение контрактов и сроков выпуска продукции, повышение прозрачности производственных процессов — 90 %, оперативный контроль затрат до 100 % в режиме реального времени, сокращение фактических циклов производства — до 30 %, снижение объемов запасов готовой продукции, складских запасов — до 15 %, существенное сокращение трудоемкости диспетчеризации и прогнозирования результатов работы предприятия.

Мультиагентная платформа успешно применена при разработке системы управления грузоперевозками Smart Trucks, в которой используется флот из более чем 100 грузовиков [13]. Система реализует полный цикл управления ресурсами в реальном времени. В результате внедрения системы примерно на 4,5 % возросло число выполненных заказов, увеличился коэффициент использования грузовиков, снизилось на 3,5 % число опозданий к клиенту, уменьшилась трудоемкость расчетов и число ошибок, уменьшилось число простоев грузовиков на 5...7 %.

Разработанная мультиагентная платформа также была успешно применена в системе управления проектами, системе управления цепочками поставок и ряде других приложений.

В работе представлены особенности реализации мультиагентной платформы для создания интеллектуальных систем управления ресурсами в реальном времени.

Архитектура платформы позволяет разработать и применить механизмы самоорганизации для адаптивного планирования на основе взаимодействия конкурирующих и кооперирующихся агентов потребностей и возможностей, улучшающих свое внутреннее состояние путем актов купли-продажи наилучших мест в расписании.

При этом первоначально созданный план непрерывно и постепенно улучшается в проактивном режиме с учетом задаваемых критериев.

Разработанная платформа была применена для решения широкого круга сложных задач, от управления доставкой грузов на Российский сегмент Международной космической станции до управления предприятием машиностроения, что показывает применимость созданной платформы в различных областях. Результаты внедрений подтверждают значительное повышение эффективности использования ресурсов на 20...40 % за счет перехода к принятию решений в реальном времени.

Реализованные проекты показывают такие важные преимущества мультиагентного подхода, как повышение уровня сервиса, возможность решения сложных задач планирования и оптимизации ресурсов в реальном времени, высокую оперативность и гибкость решения, надежность и живучесть создаваемых систем, а также минимизацию рисков для предприятий.

Список литературы

1. **Leung Y.** Handbook of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis // CRC Computer and Information Science Series. London: Chapman & Hall / SRC, 2004. 1216 p.
2. **Shirzadeh C., Shadrokh Sh.** A Branch and Bound Algorithm for Resource Constrained Project Scheduling Problem subject to Cumulative Resources // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2012. Vol. 6. P. 23—28.
3. **Vos S.** Meta-heuristics: The State of the Art in Local Search for Planning and Scheduling / A. Nareyek (Ed.). Berlin: Springer-Verlag, 2001. P. 1—23.
4. **Rolf C. R., Kuchcinski K.** Distributed constraint programming with agents // Proc. of 2nd Int. Conf. on Adaptive and Intelligent Systems (ICAIS 2011), September 6—8, 2011, Klagenfurt, Austria. Berlin: Springer-Verlag, 2011. P. 320—331.
5. **Gongfa L.** A hybrid particle swarm algorithm to JSP problem // IET Journal of Adaptive & Dynamic Computing, 2011. Vol. 2011, N. 3. P. 10—17.
6. **Xueni Q., Lau H.** An AIS-based Hybrid Algorithm with PSO for Job Shop Scheduling Problem // Proc. of 10th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, July 1—2, 2010, Lisbon, Portugal. Elsevier Science Direct — IFAC PapersOnline. 2010. P. 371—376.
7. **Pinedo M.** Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems. Springer, 2012. 676 p.
8. **Виттих В. А., Скобелев П. О.** Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени // Автоматика. 2009. № 2. С. 78—87.
9. **Виттих В. А., Скобелев П. О.** Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // Автоматика и телемеханика. 2003. № 1. С. 177—185.
10. **Skobelev P.** Multi-Agent Systems for Real Time Adaptive Resource Management. In Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry. Paulo Leitao, Stamatias Karnouskos (Ed.). Elsevier, 2015. P. 207—230.

11. Belousov A. A., Skobelev P. O., Stepanov M. E. Network-centric approach to adaptive real-time train scheduling // Proc. of 6th Int. Conf. on Swarm Intelligence (ICSI), 26–29 June, 2015, Beijing, China. Part II. Springer: Lecture Notes on Computer Science. 2015. Vol. 9141. P. 290–299.

12. Shpilevoy V. et al. Multi-agent system "Smart Factory" for real-time workshop management in aircraft jet engines production // Proc. of 11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems

(IMS'13), May 22–24, 2013, Sao Paulo, Brazil. International Federation of Automatic Control, 2013. P. 204–209.

13. Skobelev P., Lada A., Mayorov I. Finding an initial plan of transport resources FTL allocation in a special VRP problem using linear programming methods // Proc. of 19th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics (WMSCI 2015), July 12–15, 2015, Orlando, Florida, USA. Vol. 1. 2015. International Institute of Informatics and Systemics. P. 16–21.

Application of the Multi-Agent Platform for Development of Smart Resource Management Systems in Real-Time

I. V. Mayorov, imayorov@smartsolutions-123.ru✉,

Software Engineering Company "Smart Solutions" Ltd., Samara, 443013, Russian Federation

Corresponding author: Mayorov Igor V., Head of Mathematics & Modeling Department at Software Engineering Company "Smart Solutions" Ltd., Samara, 443013, Russian Federation, Tel./Fax: + 7 (846) 279-37-79, e-mail: imayorov@smartsolutions-123.ru

Received on October 12, 2015

Accepted on October 26, 2015

Problem statement: The paper considers a task of multi-agent platform development for designing smart resource management systems in real time. Multi-agent platform is based on main classes of interacting agents with competing interests represented by satisfaction and penalty functions. **Methods:** A method of multi-criteria planning of production and transport resources is proposed, based on a modified model of demand and resource network of enterprises, where various criteria are alternately improved depending on the situation reflected by the state of resources and incoming event flow. Every cycle of replanning has two stages: conflict-free planning and proactive schedule improving with conflicts resolutions. Enterprise production orders and industrial/human resources serve as demands and resources, correspondingly. Demand and resource network agents have their own goals but are capable of making a compromise to achieve a common interest of the whole system. **Results:** The paper experimentally demonstrates the opportunity of solving complex tasks of resource management, which cannot be solved by traditional methods and known heuristics with required quality and efficiency. **Practical value:** The developed method and platform can be applied when designing industrial systems of resource management in various domains, providing a 20–40 % increase of enterprise efficiency. The following systems has been developed and put into operation: a multi-agent system for scheduling of flight program, cargo flow and resources of the Russian Segment of the International Space Station; a system of railway transportation management; a system for workshop management of a machine-building enterprise; a system of transportation logistics and some others.

Keywords: multi-agent platform, decision-making support, adaptive planning, multi-agent technology, real-time planning, industrial applications

Acknowledgements: The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation

For citation:

Mayorov I. V. Application of the Multi-Agent Platform for Development of Smart Resource Management Systems in Real-time, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 37–41.

DOI: 10.17587/mau/17.37-41

References

1. Leung Y. Handbook of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis, *CRC Computer and Information Science Series*, London, Chapman & Hall / CRC, 2004, 1216 p.

2. Shirzadeh C., Shadrokh Sh. A Branch and Bound Algorithm for Resource Constrained Project Scheduling Problem subject to Cumulative Resources, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2012, vol. 6, pp. 23–28.

3. Vos S. Meta-heuristics: The State of the Art in Local Search for Planning and Scheduling / A. Nareyek (Ed.), Berlin, Springer-Verlag, 2001, pp. 1–23.

4. Rolf C. R., Kuchcinski K. Distributed constraint programming with agents, *Proc. of 2nd Int. Conf on Adaptive and Intelligent Systems (ICAIS 2011)*, September 6–8, 2011, Klagenfurt, Austria, Berlin, Springer-Verlag, 2011, pp. 320–331.

5. Gongfa L. A hybrid particle swarm algorithm to JSP problem, *IET Journal of Adaptive & Dynamic Computing*, vol. 2011, no. 3, pp. 10–17.

6. Xueni Q., Lau H. An AIS-based Hybrid Algorithm with PSO for Job Shop Scheduling Problem, *Proc. of 10th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems*, July 1–2, 2010, Lisbon, Portugal, Elsevier Science Direct — IFAC PapersOnline, 2010, pp. 371–376.

7. Pinedo M. Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems, Springer, 2012, 676 p.

8. Vittih V. A., Skobelev P. Metod sopryazhennykh vzaimodejstviy dlya upravleniya raspredeleniem resursov v real'nom masshtabe vremeni (Open multi-agent systems for decision-making support), *Avtometriya, Journal of Siberian Branch of Russian Academy of Science*, 2009, no. 2, pp. 78–87 (in Russian).

9. Skobelev P., Vittikh V. Mul'tiagentnye modeli vzaimodejstviya dlya postroeniya setej potrebnostej i vozmozhnostej v otkrytykh sistemah (Models of Self-organization for Designing Demand-Resource Networks), *Automation and Control, Journal of Russian Academy of Science*, 2003, no. 1, pp. 177–185 (in Russian).

10. Skobelev P. Multi-Agent Systems for Real Time Adaptive Resource Management. In *Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry*, Paulo Leitão, Stamatis Karnouskos (Ed.), Elsevier, 2015, pp. 207–230.

11. Belousov A. A., Skobelev P. O., Stepanov M. E. Network-centric approach to adaptive real-time train scheduling, *Proc. of 6th Int. Conf. on Swarm Intelligence (ICSI)*, 26–29 June, 2015, Beijing, China. Part II. Springer, *Lecture Notes on Computer Science*, 2015, vol. 9141, pp. 290–299.

12. Shpilevoy V. et al. Multi-agent system "Smart Factory" for real-time workshop management in aircraft jet engines production, Proc. of 11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems (IMS'13), May 22–24, 2013, São Paulo, Brazil, International Federation of Automatic Control, 2013, pp. 204–209.

13. Skobelev P., Lada A., Mayorov I. Finding an initial plan of transport resources FTL allocation in a special VRP problem using linear programming methods, *Proc. of 19th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics (WMSCI 2015)*, July 12–15, 2015, Orlando, Florida, USA, vol. 1, 2015, International Institute of Informatics and Systemics, pp. 16–21.

О. И. Лакхин, руководитель направления аэрокосмических систем, lakhin@smartsolutions-123.ru

Особенности реализации интерактивной мультиагентной системы построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов Российского сегмента Международной космической станции¹

Рассматривается реализация интерактивной мультиагентной системы построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов Российского сегмента Международной космической станции. Система решает проблемы поддержки жизнедеятельности экипажа и обеспечения нормального функционирования Российского сегмента Международной космической станции (РС МКС), а также повышения эффективности принятия решений специалистами РКК "Энергия" при построении программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС. Система реализует метод адаптивного планирования программы полета и грузопотока РС МКС в реальном времени, учитывающий приоритеты, правила, ограничения грузов и транспортных кораблей. Показано, что система способна гибко и эффективно адаптировать программу полета и план грузопотока РС МКС по событиям в реальном времени.

Ключевые слова: Российский сегмент Международной космической станции, адаптивное планирование, мультиагентные системы, программа полета, грузопоток, онтология

Введение

Для нормального функционирования Российского сегмента Международной космической станции (РС МКС) требуется решение большого числа взаимосвязанных задач планирования полетов (включая старты, стыковки и отстыковки) транспортных грузовых и пилотируемых кораблей с учетом различных требований, а также поддержки жизнедеятельности экипажа, доставки на борт РС МКС необходимого оборудования, различных материалов и инструментов. В последнее время при решении данной проблемы многим ученым, инженерам и руководителям приходилось прибегать к миллионам операций, для того чтобы найти компромиссное решение по обеспечению РС МКС всеми необходимыми материалами с учетом множества условий и ограничений. Для того чтобы сократить время принятия решений и увеличить их эффективность, в 2010 г. был запущен проект по разработке интерактивной мультиагентной системы построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС.

Для обеспечения целесообразности и эффективности принятия решений с самого начала предполагалось разрабатывать такую систему на основе современных программных средств. Поскольку обеспечение грузами РС МКС может рассматриваться как сложная сеть непрерывно действующих и коэволюционирующих планировщиков, базой для общего решения стала холоническая парадигма на основе мультиагентного подхода [1–2] и подход, основанный на поведении мира живой природы [3], который требует развития новых методов и средств поддержания базовых механизмов самоорганизации и эволюции, присущих живой природе (колонии муравьев, рой пчел и т. д.).

В данной работе представлены результаты разработки и внедрения мультиагентной системы, по-

зволяющей согласованно строить программу полетов космических кораблей и их стыковок к РС МКС, планировать грузопоток и утилизацию грузов, поддерживать уровень топлива, воды и продовольствия на борту, а также управлять экипажем космического корабля. В данной системе был реализован метод адаптивного планирования грузопотока РС МКС [4], развивающий предложенный ранее метод сопряженных взаимодействий в сетях потребностей и возможностей (ПВ-сетях) за счет использования приоритетов грузов [5–6], обеспечивающий адаптивную обработку событий, не требующую останова и перезапуска системы. Показываются основные преимущества и результаты от внедрения системы.

1. Проблемы и основные особенности планирования

Проблема поддержания эффективного функционирования РС МКС и особенности постановки задачи планирования программы полета и грузопотока РС МКС рассматриваются в работе [7]. Построение программы полета, планирование грузопотока и расчет ресурсов РС МКС состоит из нескольких этапов с разным горизонтом планирования.

На первом этапе создается стратегическая модель грузопотока, которая помогает рассчитать число необходимых полетов транспортных кораблей в год на основе числа ожидаемых экспедиций. Затем начинается процесс интерактивного построения программы полета. На данном этапе определяются и согласовываются всеми заинтересованными сторонами число и время стыковок и отстыковок космических кораблей и модулей РС МКС с учетом периодов возможных стартов космических кораблей, солнечной активности, конфигурации и ожидаемого расположения РС МКС, требований экипажа и т. д. На этом этапе разрабатываются и рассматриваются несколько вариантов программы полета, пока не будет согласован и утвержден окончательный ее вариант.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ.

На следующем этапе начинается интерактивный процесс планирования грузопотока и расчета баланса топлива и воды. Объемы грузов распределяются по полетам транспортных грузовых и пилотируемых кораблей на основе данных о среднем потреблении ресурсов экипажем и системами станции. Информация о числе космонавтов и о датах стартов и стыковок берется из утвержденной программы полета. Поставки топлива рассчитываются на основе данных о корректировке орбиты РС МКС и затратах топлива на стыковки и другие операции.

Далее план грузопотока дополняется планами размещения грузов на станции, а также утилизации использованных грузов на затапливаемых транспортных грузовых кораблях и возврата на Землю результатов космических экспериментов на транспортных пилотируемых кораблях.

В ходе планирования вырабатываются следующие виды планов:

- программа полетов, представляющая собой график стыковок космических кораблей и модулей (отсеков) РС МКС, учитывающий различные ограничения, такие как минимальный период времени между операциями стыковки и расстыковки, необходимость постоянного наличия по меньшей мере одного пилотируемого корабля, пристыкованного к станции, а также различные предпочтения для стыковки различных типов судов;
- стратегический (укрупненный) план грузопотока, рассчитываемый на основе программы полетов и общего знания о потреблении с учетом необходимых технологических операций, численности космонавтов на борту станции и т. д.;
- тактический план грузопотока, который указывает конкретные даты и объемы грузов для поставок воды, топлива и продовольствия, систем, блоков и материалов для грузовых рейсов и пилотируемых космических кораблей, основанный на программе полетов;
- планы утилизации и возврата грузов на Землю, рассчитанные с учетом наличия свободного места на РС МКС и даты отстыковки и возврата кораблей.

Основная проблема и сложность планирования заключается во взаимозависимости всех этих планов и принимаемых решений, что требует смыслового согласования и точной координации действий с учетом всех перечисленных факторов.

Ввиду особенности согласованного планирования программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС система поддержки принятия решений разрабатывалась как адаптивная сеть интеллектуальных планировщиков. При этом планировщики могут конкурировать и сотрудничать, осуществлять согласованные действия и адаптироваться, объединять свои сервисы для пользователей и индивидуально выполнять различные требования. Каждое возникающее событие может повлиять на всю сеть и требует общей реакции от всех зависимых компонентов, которые учитывают как личные цели, так и ограничения каждого из членов, принимающих решение. Для обеспечения такого со-

трудничества и адаптивности принятия решений каждый планировщик разрабатывался на основе мультиагентной платформы [8], которая была применена несколько лет назад и доказала свою эффективность в области планирования грузоперевозок и производственных ресурсов.

Данный подход позволяет разрабатывать перестраиваемые и способные к реагированию системы благодаря таким биологическим механизмам, как интеллект роя и самоорганизация. Помимо способности реагировать на внезапные непредвиденные изменения разрабатываемая система должна обладать простотой в использовании и обслуживании. Предлагаемая архитектура ориентирована на модульное построение моделей разнообразного поведения агентов, их способностей и самоанализа, а также на улучшение работы агентов благодаря использованию семантики и онтологии знаний.

2. Архитектура системы, виртуальный мир, база знаний

Для повышения эффективности управления грузопотоком РС МКС разработанная сетевая мультиагентная система представляет собой адаптивную сеть, имеющую в своем составе:

- мультиагентный планировщик программы полетов;
- мультиагентный планировщик поблочного грузопотока;
- мультиагентный планировщик размещения грузов на станции;
- мультиагентный планировщик возврата грузов и их утилизации;
- мультиагентный планировщик расчета ресурсов для прогнозирования расходов топлива, воды, пищи и прочих расходуемых ресурсов на станции;
- мультиагентный планировщик расчета времени экипажа.

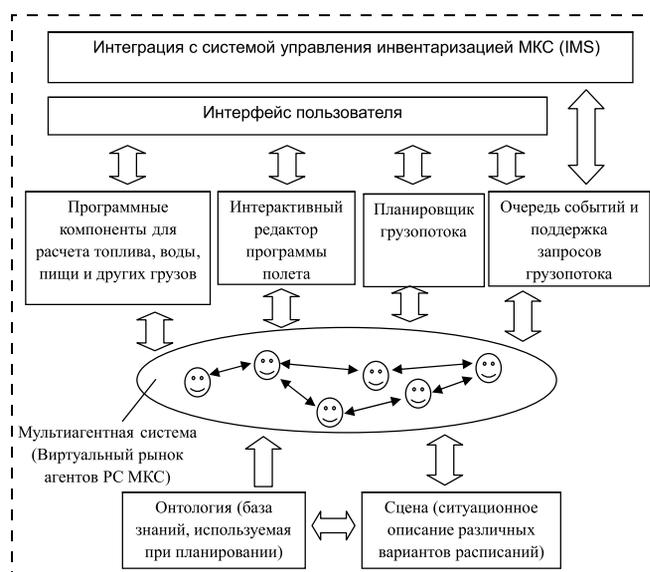


Рис. 1. Архитектура интерактивной мультиагентной системы построения программы полета, планирования грузопотока и расчета ресурсов РС МКС

В архитектуре мультиагентной системы (рис. 1) каждый планировщик организован как отдельный модуль, планирование в котором осуществляется агентами, и имеет свой пользовательский интерфейс.

Виртуальный мир каждого планировщика построен на основе концепции ПВ-сети и имеет ряд специализированных агентов.

Каждый планировщик обладает агентами собственного типа. Например, в планировщике программы полетов есть Агенты космического корабля, Агенты экспедиции и Агенты космонавтов, в то время как в планировщике грузопотока есть Агенты груза и Агенты полета. Некоторые классы агентов могут существовать в двух или более виртуальных мирах, имея разную функциональность, но обеспечивая сопряжение и взаимодействие между планировщиками.

Например, Агент полета присутствует как в Планировщике программы полетов, так и в Планировщике грузопотока. Если из-за задержки подготовки корабля начало полета откладывается, агент этого полета, присутствующий в виртуальном мире программы полетов, меняет свой план, т. е. даты запуска, стыковки и расстыковки. А так как он задействован как в программе полетов, так и в грузопотоке, то его сообщение об изменениях в плане предупредит Агентов грузов в планировщике грузопотока о задержке их полета и даст им возможность успеть "перепрыгнуть" на другой полет, если это требуется.

И наоборот, если объем некоторых грузов уменьшается, то коэффициент загрузки полета может стать слишком низким, что будет тотчас же отражено ростом неудовлетворенности Агента полета. Этот агент будет пытаться сдвинуть свой полет на более позднее время в программе полетов, чтобы стать более эффективным и привлекательным для других Агентов грузов.

Рассмотрим более подробно пример работы пользователей и взаимодействия агентов в системе. Пусть

- от куратора поступает новый запрос на доставку нового груза в определенное время — по этому событию создается новый Агент груза (потребность);
- новый Агент груза взаимодействует с Агентами полетов, которые уже имеются в системе, чтобы найти свое наилучшее размещение;
- если подходящего полета еще нет, то инициируются попытки совместно с Агентами кораблей создать новый полет или осуществить сдвиг уже имеющегося;
- если на выбранном полете достаточно свободного пространства, и данный груз умещается по массе и размерам, новый груз включается в график;
- в противном случае Агент груза пытается вытеснить один из уже размещенных ранее грузов, который имеет меньшую важность или больший резерв по времени;

- с этой целью Агент груза отправляет выбранным агентам запрос на уменьшение своих объемов и массы или перемещение в другие полеты с учетом неумываемого установленного количества ресурса, которое должно быть всегда доступно на станции;
- из полученных в ответ вариантов делается попытка найти наилучшую конфигурацию, что, возможно, вызовет еще несколько взаимодействий и итераций для поиска уступок и более гармоничного решения;
- если роста ценности решения больше не наблюдается, то фиксируется "динамический останов" (система продолжает работать, но изменений плана больше не происходит), и решение выдается пользователю;
- пользователь может вручную переместить грузы на другие полеты, если необходимо, "заморозить" часть грузов от изменения размещений и т. д.

В приведенном выше примере процесса переговоров агентов может развиваться вспыхивающая "цепная реакция" перестановок, которая будет захватывать и менять принятые ранее решения, поскольку часть грузов после размещения всегда остается не полностью удовлетворенной и только и ждет возможности "перепрыгнуть" в другой корабль или перейти на другой полет при первом же случае.

Для обеспечения такого типа взаимодействий все агенты помещены на единый виртуальный рынок и связаны с одним или несколькими планировщиками принятия решений, образующими сеть адаптивных планировщиков.

Все важные знания предметной области построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС, включая описание типов агентов, предпочтений и ограничений, содержатся в онтологии, которая по сути представляет собой базу знаний планирования [9, 10]. Онтология формализует концептуальные знания предметной области и отделяет их от программного кода. Знания представлены в онтологии как семантическая сеть по-

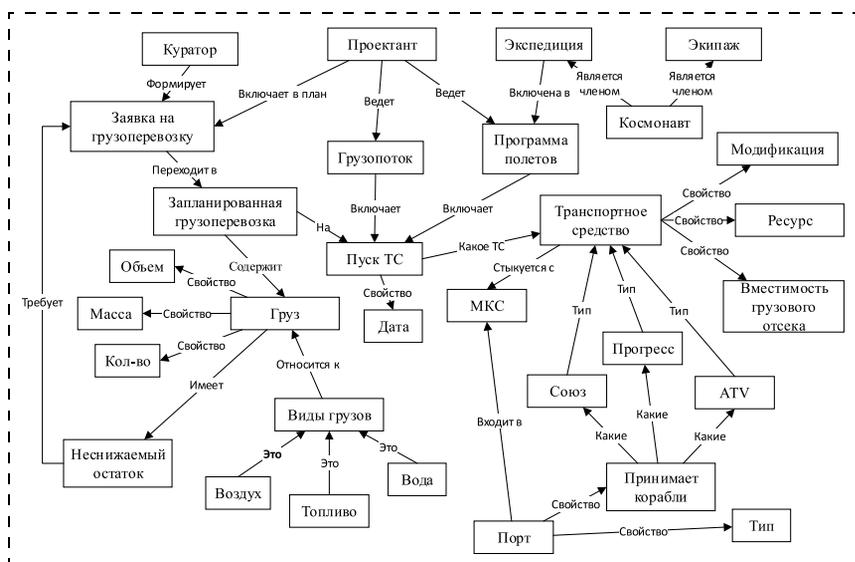


Рис. 2. Фрагмент онтологии программы полета и грузопотока

нятий о предметной области, которые определяют их атрибутами и отношениями.

Классы объектов предметной области, представленные в онтологии, включают в себя следующие: МКС, Модуль МКС, Полет, Порт, Космический корабль, Экипаж, Груз, Топливо, Программа полетов, Ресурс, Грузовой отсек, Стыковочный отсек, Служебный модуль, Исследовательский модуль, Прогресс-М, Союз и т. д. Классы основных объектов связаны отношениями внутри семантической сети, включая такие отношения, как "Состоит из" (модуль из подсистем), "Может пристыковаться к" (корабль к модулю или отсеку), "Является" классом (род—вид) и другие (рис. 2).

Онтология может быть изменена пользователями с помощью простого пользовательского интерфейса, который позволяет редактировать онтологию без отключения системы. Например, пользователи могут задать новые типы транспортных средств и указать, к каким портам они могут быть пристыкованы, а также указать новые типы портов/модулей, ввести новые виды грузов и операций и т. д.

Онтология является основой для построения концептуальных моделей сложных объектов предметной области и моделей ситуаций, представляемых как сцены мира МКС, задаваемых на вход виртуального мира мультиагентной системы планирования полетов и грузопотока МКС.

3. Интерфейс пользователя

Примеры экранов системы представлены на рис. 3 (см. вторую сторону обложки) и рис. 4, 5 (см. третью сторону обложки). Пользователи могут создавать различные версии программы полета и сравнивать их между собой, после чего строить под каждую версию свой план грузопотока и далее планы размещения, возврата и утилизации грузов.

Разработанные в системе версии программы полетов и грузопотока становятся доступными для согласования кураторами. В системе также обеспечивается построение различных отчетов и поддержка пользователя на основе предоставления аналитических графиков с основными показателями эффективности.

Интеграция с системой управления инвентаризацией РС МКС позволяет вносить изменения в созданный план с учетом реальных данных и инициировать перепланирование для реакции в режиме реального времени.

Заключение

Данная статья представляет реализацию интерактивной мультиагентной системы построения программы полета, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС на основе мультиагентной платформы. Система создана по аналогии с миром живой природы, что позволяет осуществлять более быстрое принятие решений по сравнению с традиционными системами, которые основаны на иерархическом процессе принятия решений. В результате время планирования было снижено, а число анализируемых вариантов было увеличено, что привело к со-

кращению рисков при эксплуатации и жизнеобеспечении РС МКС.

С использованием данной системы были созданы программы нескольких полетов в период с 2010 по 2016 годы. Основная отличительная черта системы заключается в том, что она позволяет получить и сравнить несколько вариантов, в том числе и при моделировании возможных последствий непредвиденных событий, что очень важно в космонавтике.

Ключевым результатом внедрения системы для повышения эффективности работы предприятия является уменьшение трудоемкости и времени, затрачиваемого на планирование, и, как следствие, возможность моделирования различных вариантов расписания, а также поддержки взаимодействий и переговоров между заинтересованными участниками, направленных на поиск лучшей реакции на внешние события и адаптацию планов "на лету" в ходе работы предприятия. Эти возможности помогают свести к минимуму возможные риски и подготовиться к оперативному управлению непредвиденными событиями.

Дальнейшее развитие данной системы включает в себя улучшения мультиагентного взаимодействия для того, чтобы иметь возможность быстрее реагировать на непредвиденные события и чрезвычайные ситуации и поддерживать принятие решений в реальном времени. Для обеспечения таких возможностей планируется создание нового мультиагентного планировщика для планирования полетных операций космонавтов [11].

Разработанная система внедрена в промышленную эксплуатацию в ОАО "РКК "Энергия" и применяется для планирования программы полетов, грузопотока и расчета ресурсов РС МКС.

Список литературы

1. **Wooldridge M.** An Introduction to Multi-Agent Systems. Chichester, England: John Wiley and Sons Ltd, 2002. 340 p.
2. **Vos S.** Meta-heuristics: The State of the Art in Local Search for Planning and Scheduling / Eds A. Nareyek. Berlin: Springer-Verlag, 2001. P. 1—23.
3. **Rzevski G., Skobelev P.** Managing Complexity. Southampton, UK: WIT Press, 2014. 202 p.
4. **Ляхин О. И., Майоров И. В.** Метод адаптивного планирования грузопотока РС МКС на основе мультиагентных технологий // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 12. С. 847—852.
5. **Виттих В. А., Скобелев П. О.** Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени // Автоматизация. 2009. № 2. С. 78—87.
6. **Виттих В. А., Скобелев П. О.** Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // Автоматика и телемеханика. 2003. № 1. С. 177—185.
7. **Ляхин О. И.** Особенности постановки задачи планирования программы полета и грузопотока Российского сегмента Международной космической станции // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. "Технические науки". 2015. № 3 (47). С. 32—46.
8. **Майоров И. В.** Реализация мультиагентной платформы планирования ресурсов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 1. С. 37—41.
9. **Вакурина Т. Г., Котеля В. В., Ляхин О. И., Матюшин М. М., Скобелев П. О.** Онтология российского сегмента Международной космической станции и ее практическое использование в интеллектуальных аэрокосмических приложениях // Матер. IV Междунар. науч.-техн. конф. "Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем" — Open Semantic

Implementation of Multi-Agent System for Scheduling of Flight Program, Cargo Flow and Resources of International Space Station

O. I. Lakhin, lakhin@smartsolutions-123.ru✉,

Software Engineering Company "Smart Solutions" Ltd, Samara, 443011, Russian Federation

Corresponding author: Lakhin Oleg I., Head of AeroSpace Department, Software Engineering Company "Smart Solutions" Ltd, Samara, 443013, Russian Federation, Ph./Fax: + 7 (846) 279-37-79, e-mail: lakhin@smartsolutions-123.ru

Received on October 12, 2015

Accepted on October 20, 2015

Problem statement: In this paper the implementation of an interactive multi-agent system for flight program and cargo flow scheduling of the Russian segment of the International Space Station (ISS RS) is considered. The system solves the problem of the crew life support and ensuring proper functioning of ISS RS, as well as increasing the efficiency of decision-making by specialists of RSC "Energia" during ISS RS flight program and cargo flow schedule development and resource computation. The system provides a solution for a large number of interrelated tasks of flight scheduling (including starts, dockings and undockings) for transport and manned spacecrafts taking into account different requirements and deliveries of necessary equipment, various materials and tools onboard the ISS RS. **Methods:** The system implements a method of adaptive flight program and cargo flow scheduling for the ISS RS in real time, taking into account priorities, rules, restrictions of cargos and transport vehicles. This method is based on multi-agent technology for resolving conflicts through negotiation between agents. **Results:** The system can adapt the flight program and cargo flow schedule of the ISS RS flexibly and efficiently in response to events in real time. The developed interactive multi-agent system has been implemented in RSC "Energia" and is now in industrial operation. **Practical relevance:** The described system is used for flight program and cargo flow scheduling. The system supports coordinated work of 8 leading project engineers and more than 120 application managers working with manufacturers. A key result of the system introduction for improvement of the enterprise efficiency is reducing the complexity and time required for scheduling and, consequently, the capability for simulation of different schedule options for vehicles and cargos, as well as for support of interactions and negotiations among stakeholders, aimed at finding the best response to external events and adaptation of plans "on the fly" during the station operation.

Keywords: International Space Station, the Russian segment, adaptive scheduling, multi-agent systems, flight program, cargo flow, ontology

Acknowledgements: The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation

For citation:

Lakhin O. I. Implementation of Multi-Agent System for Scheduling of Flight Program, Cargo Flow and Resources of International Space Station. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 42–46.

DOI: 10.17587/mau/17.42-46

References

1. Wooldridge M. An Introduction to Multi-Agent Systems, John Wiley and Sons Ltd, Chichester, England, 2002. 340 p.
2. Vos S. Meta-heuristics: The State of the Art in Local Search for Planning and Scheduling, eds A Nareyek, Springer-Verlag, Berlin, 2001, pp. 1–23.
3. Rzevski G., Skobelev P. Managing Complexity, Southamp-ton, UK, WIT Press, 2014, 202 p.
4. Lakhin O. I., Majorov I. V. Metod adaptivnogo planirovaniya gruzopotoka RS MKS na osnove mul'tiagentnykh tehnologij (Method of adaptive cargo flow scheduling for the ISS RS on the basis of multi-agent technology), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 12, pp. 847–852 (in Russian).
5. Vittih V. A., Skobelev P. O. Metod sopryazhennykh vzaimodejstvij dlya upravleniya raspredeleniem resursov v real'nom mashtabe vremeni (Method of conjugated interactions for management of resource allocation in real time), *Avtometrija*, 2009, no. 2, pp. 78–87 (in Russian).
6. Vittih V. A., Skobelev P. O. Mul'tiagentnye modeli vzaimodejstvij a dlja postroeniya setej potrebnostej i vozmozhnostej v otkrytykh sistemah (Multi-agent models of interaction for development of demand and resource networks in open systems), *Avtomatika i Telemekhanika*, 2003, no. 1, pp. 177–185 (in Russian).
7. Lakhin O. I. Osobennosti postanovki zadachi planirovaniya programmy poleta i gruzopotoka Rossijskogo segmenta Mezhdunarodnoj kosmicheskoy stancii (Specific features of problem statement for flight program and cargo flow scheduling for the Russian segment of the International Space Station), *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta*, Seriya "Tehnicheskie Nauki", 2015, no. 3 (47), pp. 32–46 (in Russian).
8. Majorov I. V. Realizacija mul'tiagentnoj platformy planirovaniya resursov (Implementation of multi-agent platform for resource scheduling), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 37–41 (in Russian).
9. Vakurina T. G., Kotelja V. V., Lakhin O. I., Matjushin M. M., Skobelev P. O. Ontologija rossijskogo segmenta Mezhdunarodnoj kosmicheskoy stancii i ee prakticheskoe ispol'zovanie v intellektual'nyh ajerokosmicheskikh prilozhenijah (Ontology of the Russian segment of the International Space Station and its practical use in intelligent aerospace applications), *Materialy IV Mezhdunarodnoj Nauchno-Tehnicheskoy Konferencii "Otkrytye Semanticheskie Tehnologii Proektirovaniya Intellektual'nyh Sistem"* (Proc. of Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2014)), February 20–22 2014, Minsk, Publishing House of BSUIR, 2014, pp. 221–226 (in Russian).
10. Vakurina T. G., Lakhin O. I., Jurygina Ju. S., Simonova E. V., Korshikov D. N., Noskova A. I. Korporativnaja raspredelennaja ontologija dlja upravlenija rossijskim segmentom mezhdunarodnoj kosmicheskoy stancii (Corporate distributed ontology for management of the Russian segment of the International Space Station), *Proc. of XVI Internat. conf. "Problemy upravlenija i modelirovaniya v slozhnykh sistemah"*, Samara, June 30 – July 03 2014, Samara, Publishing House of SSC RAS, 2014, pp. 435–443 (in Russian).
11. Stanilovskaja V. I., Beljaev A. M., Lakhin O. I., Noskova A. I., Ivanova D. N. Podhod k adaptivnomu planirovaniju poletnykh operacij rossijskogo segmenta mezhdunarodnoj kosmicheskoy stancii na osnove mul'tiagentnykh tehnologij (Approach to adaptive scheduling of flight operations of the Russian segment of the International Space Station based on multi-agent technology), *Proc. of XVII Internat. conf. "Problemy upravlenija i modelirovaniya v slozhnykh sistemah"*, Samara, June 22–25 2015, Samara, Publishing House of SSC RAS, 2015, pp. 147–157 (in Russian).

Ю. И. Мышляев, канд. техн. наук, доц., uimysh@mail.ru, Тар Яр Мьо, аспирант, brightxstar@gmail.com, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Калужский филиал

Алгоритмы скоростного биградиента с модифицированной эталонной моделью в задаче управления вибрационным гироскопом¹

Рассматривается задача адаптивного управления одноосным вибрационным гироскопом с модифицированной моделью желаемой динамики механической подсистемы. В целях повышения астатизма системы и обеспечения гладкости управляющих сил по входам вводятся дополнительные интеграторы. Для системы с интеграторами методом скоростного биградиента синтезируется семейство гладких, релейных и комбинированных алгоритмов с настраиваемым многообразием. Рассмотрены схема синтеза алгоритмов, условия применимости, выполнен анализ устойчивости адаптивной системы управления, робастности и приводятся результаты моделирования системы.

Ключевые слова: метод скоростного биградиента, настраиваемый скользящий режим, одноосный вибрационный гироскоп, устойчивость, функция Ляпунова, робастность, модифицированная эталонная модель

Введение

В работе [1] приведены результаты синтеза системы управления одноосным вибрационным гироскопом с подсистемой приводов первого порядка. Синтез алгоритма управления осуществлялся методом скоростного биградиента (МСБГ). МСБГ [5] включает в себя три этапа: на первом этапе в условиях полной априорной информации об объекте синтезируется "идеальное" виртуальное управление конечным каскадом (механической подсистемы), обеспечивающее достижение цели управления при полной априорной информации. На втором этапе неизвестные параметры "идеального" виртуального управления заменяются настраиваемыми, и синтезируется алгоритм адаптации. На третьем этапе формируется многообразие пересечения гиперповерхностей в виде невязки между выходным сигналом входного каскада и виртуальным управлением, и синтезируется управление, обеспечивающее достижение пересечения многообразий гиперповерхностей.

Особенностью задачи управления вибрационным гироскопом является наличие эталонной модели колебаний чувствительного тела в форме линейной системы с двумя парами мнимых полюсов. В работе [1] виртуальное управление для механической подсистемы строилось в форме компенсации динамики модели ошибки слежения за траекторией эталонной модели и модальной обратной связи по ошибке и ее производной. Это обеспечивало устойчивость модели ошибки при движении системы по пересечению многообразий.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Калужской области (грант № 14-48-03115).

В данной работе предлагается подход к синтезу алгоритмов управления, основанный на использовании дополнительной модифицированной эталонной модели для ошибки слежения за траекторией эталонной модели. Модифицированная модель строится в виде линейной гурвицевой системы с входным воздействием, пропорциональным невязке между выходом входного каскада и виртуальным управлением. Целью модификации является улучшение идентифицирующих свойств и снижение энергетических затрат на управление за счет улучшения структурного соответствия модели ошибки и модифицированной эталонной модели не только на многообразии пересечений гиперповерхностей (невязка тождественно равна нулю), но и при движении вне этого многообразия. Заметим, что введение невязки в неустойчивую эталонную модель колебаний чувствительного тела или в виртуальный закон управления не позволяет достичь заданной цели.

Отметим также, что в отличие от многих работ [1, 4, 11] нами рассматривается более общая модель механической подсистемы, в которой масса чувствительного элемента считается неопределенной. При этом модифицированная эталонная модель имеет элемент самонастройки.

Постановка задачи

Математическая модель механической подсистемы одноосного вибрационного гироскопа S_1 в векторной форме с моделью приводов 1-го порядка S_2 (интеграторами) имеет вид

$$\begin{aligned} S_1: \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_b\mathbf{q} + 2\Omega\dot{\mathbf{q}} &= \mathbf{B}\mathbf{u}; \\ S_2: \dot{\mathbf{u}} &= \mathbf{v} + \boldsymbol{\eta}, \end{aligned} \quad (1)$$

Синтез алгоритмов управления

Проведем синтез алгоритма управления методом скоростного биградиента [5].

Этап 1. Решим задачу управления конечным каскадом. Введем невязку между каналами входа выходного каскада и виртуальным управлением в форме

$$\sigma_i = u_i - u_i^{virt}, \quad i \in \{x, y\}, \quad (6)$$

где u_i^{virt} — синтезируемые в ходе 1-го и 2-го этапов виртуальные управления каналами конечного каскада.

В соответствии с моделью подсистемы S_1 и эталонной моделью (2) запишем модели ошибок по каналам в виде

$$\dot{\varepsilon}_i = \begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_i \\ -\theta_*^T \mu_i + (\omega_i^*)^2 z_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ m^{-1} \end{pmatrix} u_i, \quad i \in \{x, y\}, \quad (7)$$

где $\mu_x = (\dot{x} \mid \dot{y} \mid 0 \mid -2\dot{y} \mid x \mid y \mid 0)^T$; $\mu_y = (0 \mid \dot{x} \mid \dot{y} \mid 2\dot{x} \mid 0 \mid x \mid y)^T$, $z_x \triangleq x_m$, $z_y \triangleq y_m$.

Введем желаемую динамику стабилизации положений $\varepsilon_i = 0$ в виде дополнительной модифицированной эталонной модели конечного каскада:

$$\dot{\varepsilon}_{\varepsilon i} = \mathbf{A}_{\varepsilon i} \varepsilon_{\varepsilon i} + \begin{pmatrix} 0 \\ \hat{m}^{-1} \end{pmatrix} \sigma_i, \quad i \in \{x, y\}, \quad (8)$$

где $\mathbf{A}_{\varepsilon i} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\lambda_{0i} & -\lambda_{1i} \end{pmatrix}$ — гурвицевы матрицы

($\lambda_{jx} > 0$, $\lambda_{jy} > 0$, $j = 0, 1$); \hat{m} — оценка массы m чувствительного элемента.

Введем векторы отклонений по ошибкам слежения $\mathbf{e}_i = \varepsilon_i - \varepsilon_{\varepsilon i}$. Потребуем достижения ЦУ (3) с динамикой, заданной модифицированной эталонной моделью (8), таким образом, чтобы выполнялось условие

$$\|\mathbf{e}_i\| \leq \Delta_{\mathbf{e}_i}, \quad i \in \{x, y\}, \quad \Delta_{\mathbf{e}_i} > 0 \quad \text{при } t \geq t_*. \quad (9)$$

Замечание 1. При ограниченности σ_i , \hat{m}^{-1} ($\|\sigma_i\| \leq C_1$, $\hat{m}^{-1} \leq C_2$), в силу BIBO-устойчивости (по входу-выходу) модифицированной модели (8) следует, что $\|\varepsilon_{\varepsilon i}\| \leq \Delta_{\varepsilon i}$ при $t \geq t_*$ и некотором $\Delta_{\varepsilon i}(C_1, C_2) > 0$. Из неравенства треугольника имеем $\|\varepsilon_i\| \leq \|\mathbf{e}_i\| + \|\varepsilon_{\varepsilon i}\|$ и, следовательно, $\|\varepsilon_i\| \leq \|\mathbf{e}_i\| + \|\varepsilon_{\varepsilon i}\| \leq \Delta_{\mathbf{e}_i} + \Delta_{\varepsilon i}$ при $t \geq t_*$.

Условие (3) выполняется, если $\Delta_{\mathbf{e}_i} + \Delta_{\varepsilon i} \leq \Delta_{\varepsilon_i}$, $i \in \{x, y\}$. Очевидно, что при ограниченности \hat{m}^{-1} и движении замкнутой системы на пересечении многообразий $\sigma_i \equiv 0$ при $t \geq t_*$ и (или) выполнении условия $\mathbf{e}_i \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$ также можно добиться выполнения условия (3) соответствующим выбором

где $\mathbf{q} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$, $\mathbf{u} = \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix}$, $\mathbf{B} = m^{-1} \mathbf{I}$, $\mathbf{v} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix}$,

$$\mathbf{\Omega} = \begin{pmatrix} 0 & -\Omega_z \\ \Omega_z & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{pmatrix} d_{xx} & d_{xy} \\ d_{xy} & d_{yy} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{K}_b = \begin{pmatrix} \omega_x^2 & \omega_{xy} \\ \omega_{xy} & \omega_y^2 \end{pmatrix};$$

$$\omega_x = \sqrt{\frac{k_{xx}}{m}}, \quad \omega_y = \sqrt{\frac{k_{yy}}{m}}, \quad \omega_{xy} = \frac{k_{xy}}{m}; \quad d_{xx} = m^{-1} d_{xx}^*,$$

$$d_{xy} = m^{-1} d_{xy}^*, \quad d_{yy} = m^{-1} d_{yy}^*; \quad \mathbf{I} — \text{единичная матрица;}$$

x, y — перемещение массы чувствительного тела вдоль ортогональных осей Bx, By ; m — масса чувствительного элемента; k_{xx}, k_{xy}, k_{yy} — коэффициенты упругости подвеса; $d_{xx}^*, d_{xy}^*, d_{yy}^*$ — коэффициенты демпфирования подвеса; Ω_z — угловая скорость вращения основания вибрационного гироскопа; \mathbf{v} — вектор управляющих воздействий; $\boldsymbol{\eta} = (\eta_x \ \eta_y)^T$ — вектор возмущения.

Предполагается, что $\boldsymbol{\theta}_* = (d_{xx} \ d_{xy} \ d_{yy} \ \Omega_z \ \omega_x^2 \ \omega_{xy} \ \omega_y^2)^T \in \Xi$ — вектор неизвестных параметров объекта управления; m — неизвестная масса; вектор возмущения ограничен так, что $\|\boldsymbol{\eta}(t)\| \leq C_{\eta}$, $\forall t \geq 0$.

Желаемые автоколебания для подсистемы S_1 с частотами ω_x^* , ω_y^* соответственно вдоль осей Bx и By зададим с помощью явной эталонной модели механической подсистемы гироскопа:

$$\ddot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{K}_m \mathbf{q}_m = 0, \quad \mathbf{q}_m(0) \neq 0, \quad (2)$$

где $\mathbf{q}_m = (x_m \ y_m)^T$, $\mathbf{q}_m(0)$ — вектор желаемых амплитуд; $\mathbf{K}_m = \text{diag}\{(\omega_x^*)^2 \ (\omega_y^*)^2\}$.

Выходной каскад S_1 представляет собой двухканальную систему с перекрестными связями, поэтому сформулируем цель управления (ЦУ) для каждого каскада в виде требований ограниченности траекторий замкнутой системы и достижения целевых неравенств вида

$$\|\varepsilon_i\| \leq \Delta_{\varepsilon_i}, \quad i \in \{x, y\} \quad \text{при } t \geq t_*, \quad (3)$$

где $\boldsymbol{\varepsilon}_x^T = (\varepsilon_x \ \dot{\varepsilon}_x) = (x - x_m \mid \dot{x} - \dot{x}_m)$; $\boldsymbol{\varepsilon}_y^T = (\varepsilon_y \ \dot{\varepsilon}_y) = (y - y_m \mid \dot{y} - \dot{y}_m)$; $\Delta_{\varepsilon_i} > 0$ — требуемая точность; t_* — время достижения ЦУ.

Требуется синтезировать адаптивную систему управления, обеспечив ограниченность траекторий системы, достижение цели управления (ЦУ) (3) в условиях параметрической неопределенности и идентификацию параметров гироскопа:

$$\boldsymbol{\theta} \rightarrow \boldsymbol{\theta}_* \quad \text{при } t \rightarrow \infty, \quad (4)$$

$$\hat{m} \rightarrow m \quad \text{при } t \rightarrow \infty, \quad (5)$$

где $\boldsymbol{\theta}$ — оценки вектора параметров подсистемы S_1 ; \hat{m} — оценка массы.

быстродействия модифицированной эталонной модели (8).

В соответствии с условием (9) сформируем целевое неравенство вида

$$Q(\mathbf{e}) \leq \Delta_{\mathbf{e}} \text{ при } t \geq t_*, \quad (10)$$

где $Q(\mathbf{e}) = 0,5(\mathbf{e}_x^T \mathbf{H}_x \mathbf{e}_x + \mathbf{e}_y^T \mathbf{H}_y \mathbf{e}_y)$ — целевой функционал; $\mathbf{e}^T = (\mathbf{e}_x^T \ \mathbf{e}_y^T)$; $\mathbf{H}_i = \mathbf{H}_i^T > 0, i \in \{x, y\}$; $\Delta_{\mathbf{e}} > 0$ — точность, согласованная с $\Delta_{\mathbf{e}_i}$ и матрицами \mathbf{H}_i . С учетом (6)—(8) уравнение отклонений по ошибке слежения имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}}_i &= \begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_i \\ -\boldsymbol{\theta}_*^T \boldsymbol{\mu}_i + \omega_i^{*2} z_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ m^{-1} \end{pmatrix} u_i^{virt} - \\ &- \mathbf{A}_{\varepsilon i} \boldsymbol{\varepsilon}_{\varepsilon i} + \begin{pmatrix} 0 \\ m^{-1} - \hat{m}^{-1} \end{pmatrix} \sigma_i, \quad i \in \{x, y\}. \end{aligned} \quad (11)$$

Рассмотрим задачу достижения целевого условия (10) при полной априорной информации о параметрах подсистемы S_1 и гипотетической возможности непосредственного управления выходным каскадом. Введем в рассмотрение $\mathbf{u}_*^{virt} = (u_{x*}^{virt} \ u_{y*}^{virt})^T$ — "идеальное" виртуальное управление, подчеркивая его зависимость от параметров выходного каскада S_1 . Выберем $\hat{m} = m$ и u_{i*}^{virt} в форме алгоритмов модального управления с компенсацией

$$u_{i*}^{virt} = m(\boldsymbol{\theta}_*^T \boldsymbol{\mu}_i + v_i), \quad (12)$$

где $v_x = -\omega_x^{*2} x_m - \lambda_{0x} \varepsilon_x - \lambda_{1x} \dot{\varepsilon}_x$,

$v_y = -\omega_y^{*2} y_m - \lambda_{0y} \varepsilon_y - \lambda_{1y} \dot{\varepsilon}_y$.

Вычислим производную по времени $\omega(\mathbf{e}, \boldsymbol{\theta}_*, m)$ от целевого функционала $Q(\mathbf{e})$ при $u_i^{virt} = u_{i*}^{virt}$, $\hat{m} = m$. Имеем

$$\begin{aligned} \omega(\mathbf{e}, \boldsymbol{\theta}_*, m) &= \mathbf{e}_x^T \mathbf{H}_x \dot{\mathbf{e}}_x + \mathbf{e}_y^T \mathbf{H}_y \dot{\mathbf{e}}_y = \\ &= \mathbf{e}_x^T \mathbf{A}_{\varepsilon x} \mathbf{e}_x + \mathbf{e}_y^T \mathbf{A}_{\varepsilon y} \mathbf{e}_y \leq \\ &\leq -\rho_x 0,5 \mathbf{e}_x^T \mathbf{H}_x \mathbf{e}_x - \rho_y 0,5 \mathbf{e}_y^T \mathbf{H}_y \mathbf{e}_y \leq -\rho Q(\mathbf{e}), \end{aligned} \quad (13)$$

где $\mathbf{A}_{\varepsilon x}, \mathbf{A}_{\varepsilon y}$ — гурвицевы матрицы, $\mathbf{H}_i = \mathbf{H}_i^T > 0$, удовлетворяющие уравнениям Ляпунова

$$\mathbf{H}_i \mathbf{A}_{\varepsilon i} + \mathbf{A}_{\varepsilon i}^T \mathbf{H}_i = -\mathbf{G}_i, \quad \mathbf{G}_i = \mathbf{G}_i^T > 0, \quad i \in \{x, y\}; \quad (14)$$

$$\rho_i = \lambda_{\min}(\mathbf{G}_i) / \lambda_{\max}(\mathbf{H}_i), \quad \rho = \min\{\rho_x, \rho_y\} > 0.$$

Следовательно, $Q(\mathbf{e}(t)) \leq Q(\mathbf{e}(0)) \exp(-\rho t)$, $Q(\mathbf{e}(t)) \rightarrow 0, t \rightarrow \infty$, и, в силу квадратичной формы $Q(\mathbf{e})$, получаем $\mathbf{e} \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$. Таким образом, при $u_i^{virt} = u_{i*}^{virt}$, $\hat{m} = m$ и любом отклонении траектории системы от многообразия $\boldsymbol{\sigma} \equiv 0$ ЦУ (10) достигается.

Этан 2. Заменим в соотношении (12) неизвестные параметры $\boldsymbol{\theta}_*$ настраиваемыми $\boldsymbol{\theta}$, а также m на \hat{m} . Получим виртуальные управления вида

$$u_i^{virt} = \hat{m}(\boldsymbol{\theta}^T \boldsymbol{\mu}_i + v_i). \quad (15)$$

Вычислим $\omega(\mathbf{e}, \boldsymbol{\theta}, \hat{m})$ — скорость изменения по времени целевого функционала $Q(\mathbf{e})$ (от слагаемых $Q_i \triangleq 0,5 \mathbf{e}_i^T \mathbf{H}_i \mathbf{e}_i, i \in \{x, y\}$ при $u_i = \sigma_i + u_i^{virt}$, где u_i^{virt} определяются из равенств (15))

$$\begin{aligned} \dot{Q}_i &= \mathbf{e}_i^T \mathbf{H}_i \left[\begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_i \\ -\boldsymbol{\theta}_*^T \boldsymbol{\mu}_i + (\omega_i^*)^2 z_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ m^{-1} \end{pmatrix} \hat{m}(\boldsymbol{\theta}^T \boldsymbol{\mu}_i + v_i) - \right. \\ &\left. - \mathbf{A}_{\varepsilon i} \boldsymbol{\varepsilon}_{\varepsilon i} + \begin{pmatrix} 0 \\ m^{-1} - \hat{m}^{-1} \end{pmatrix} \sigma_i \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

Проведем дополнительные преобразования с учетом (12), (13):

$$\begin{aligned} \dot{Q}_i &= \mathbf{e}_i^T \mathbf{H}_i \left[\begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_i \\ -\boldsymbol{\theta}_*^T \boldsymbol{\mu}_i + (\omega_i^*)^2 z_i \end{pmatrix} - \mathbf{A}_{\varepsilon i} \boldsymbol{\varepsilon}_{\varepsilon i} + \right. \\ &\left. + \begin{pmatrix} 0 \\ m^{-1} \end{pmatrix} (\hat{m}(\boldsymbol{\theta}^T \boldsymbol{\mu}_i + v_i) \pm u_{i*}^{virt}) + \begin{pmatrix} 0 \\ m^{-1} - \hat{m}^{-1} \end{pmatrix} \sigma_i \right] = \\ &= \mathbf{e}_i^T \mathbf{H}_i \mathbf{A}_{\varepsilon i} \mathbf{e}_i + \mathbf{e}_i^T \mathbf{H}_i \left[\begin{pmatrix} 0 \\ m^{-1} \end{pmatrix} (\hat{m}(\boldsymbol{\theta}^T \boldsymbol{\mu}_i + v_i) - u_{i*}^{virt}) + \right. \\ &\left. + \begin{pmatrix} 0 \\ m^{-1} - \hat{m}^{-1} \end{pmatrix} \sigma_i \right] \leq -\rho_i 0,5 \mathbf{e}_i^T \mathbf{H}_i \mathbf{e}_i + \\ &+ \mathbf{e}_i^T \mathbf{H}_i \left[\begin{pmatrix} 0 \\ m^{-1} \end{pmatrix} (\hat{m}(\boldsymbol{\theta}^T \boldsymbol{\mu}_i + v_i) - m(\boldsymbol{\theta}_*^T \boldsymbol{\mu}_i + v_i)) \pm \right. \\ &\left. \pm m(\boldsymbol{\theta}^T \boldsymbol{\mu}_i + v_i) + \begin{pmatrix} 0 \\ m^{-1} - \hat{m}^{-1} \end{pmatrix} \sigma_i \right] = \\ &= -\rho_i Q_i + \delta_i m^{-1} [(\hat{m} - m)(\boldsymbol{\theta}^T \boldsymbol{\mu}_i + v_i) + \\ &+ m(\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_*)^T \boldsymbol{\mu}_i] + \delta_i \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{\hat{m}} \right) \sigma_i, \end{aligned}$$

где $\delta_i = e_i h_{12}^i + \dot{\varepsilon}_i h_{22}^i$, $\mathbf{H}_i = (h_{ij}^i), i \in \{x, y\}; j, k = 1, 2$ — матрицы, удовлетворяющие уравнениям Ляпунова (14).

Окончательно с учетом равенства (6) получаем

$$\begin{aligned} \dot{Q}_i &\leq -\rho_i Q_i + \delta_i (m \hat{m})^{-1} (\hat{m} - m) [\hat{m}(\boldsymbol{\theta}^T \boldsymbol{\mu}_i + v_i)] + \\ &+ \delta_i (\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_*)^T \boldsymbol{\mu}_i + \delta_i \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{\hat{m}} \right) \sigma_i = \\ &= -\rho_i Q_i + \delta_i \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{\hat{m}} \right) u_i^{virt} + (\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_*)^T \delta_i \boldsymbol{\mu}_i + \\ &+ \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{\hat{m}} \right) \delta_i \sigma_i = -\rho_i Q_i + \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{\hat{m}} \right) (\delta_i (u_i^{virt} + \sigma_i)) + \\ &+ (\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_*)^T \delta_i \boldsymbol{\mu}_i = -\rho_i Q_i + \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{\hat{m}} \right) (\delta_i u_i) + (\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_*)^T \delta_i \boldsymbol{\mu}_i. \end{aligned}$$

Таким образом, производная от целевой функции $Q(\mathbf{e})$ удовлетворяет неравенству

$$\omega(\mathbf{e}, \boldsymbol{\theta}, \hat{m}) \leq -\rho_x Q_x - \rho_y Q_y + (\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_*)^T \{\delta_x \boldsymbol{\mu}_x + \delta_y \boldsymbol{\mu}_y\} + \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{\hat{m}} \right) \{\delta_x u_x + \delta_y u_y\}, \quad (17)$$

в которую $\boldsymbol{\theta}$, \hat{m}^{-1} входят линейно. Вычисляя градиенты функции $\omega(\mathbf{e}, \boldsymbol{\theta}, \hat{m})$ по настраиваемым параметрам, получаем алгоритмы адаптации в дифференциальной форме:

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = -\Gamma \nabla_{\boldsymbol{\theta}} \omega(\mathbf{e}, \boldsymbol{\theta}) = -\Gamma (\delta_x \boldsymbol{\mu}_x + \delta_y \boldsymbol{\mu}_y), \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{m}}^{-1} &= -\gamma \nabla_{\hat{m}^{-1}} \omega(\mathbf{e}, \boldsymbol{\theta}, \hat{m}) = \gamma (\delta_x u_x + \delta_y u_y) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \dot{\hat{m}} = -\gamma (\delta_x u_x + \delta_y u_y) \hat{m}^2, \end{aligned} \quad (19)$$

где $\Gamma = \Gamma^T > 0$ — (7×7) -мерная матрица коэффициентов усиления (в частности $\Gamma = \text{diag}\{\gamma_i, i = \overline{1, 7}\}$, $\gamma_i > 0$), $\gamma > 0$, $\hat{m}(0) > 0$.

Эман 3. Введем дополнительный целевой функционал (ЦФ), характеризующий отклонение траектории системы от пересечения многообразий:

$$R(\boldsymbol{\sigma}) = 0,5 \boldsymbol{\sigma}^T \boldsymbol{\sigma}, \quad (20)$$

где $\boldsymbol{\sigma}^T = (\sigma_x \sigma_y)$.

Вычислим скорость изменения ЦФ (20):

$$\dot{R}(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{v}) \triangleq \dot{R}(\boldsymbol{\sigma}) = \boldsymbol{\sigma}^T (\dot{\mathbf{u}} - \dot{\mathbf{u}}^{virt}) = \boldsymbol{\sigma}^T (\mathbf{v} + \boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\tau}), \quad (21)$$

где $\boldsymbol{\tau}^T = (\tau_1 \tau_2)$, $\tau_i = \hat{m} (\boldsymbol{\theta}^T \boldsymbol{\mu}_i + v_i) + \hat{m} (\boldsymbol{\theta}^T \dot{\boldsymbol{\mu}}_i + \dot{v}_i)$.

Семейство алгоритмов, обеспечивающее достижение целевого неравенства

$$R(\boldsymbol{\sigma}) \leq \Delta_{\boldsymbol{\sigma}} \text{ при } t \geq t_{\boldsymbol{\sigma}} \quad (22)$$

имеет вид [8, 9]

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 - \gamma_m \boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{\sigma}), \quad (23)$$

где \mathbf{v}_0 — априорное заданное управление, которое может быть равно нулю, вектор-функция $\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{\sigma}) \in R^m$ удовлетворяет условию усиленной псевдоградиентности: $\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{\sigma})^T \nabla_{\mathbf{v}} \mu(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{v}) \geq \beta \|\nabla_{\mathbf{v}} \mu(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{v})\|^\delta$, где $\beta > 0$, $\delta = 1, 2, \dots$ — некоторые числа, $\nabla_{\mathbf{v}} \mu(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{v}) = \boldsymbol{\sigma}$ — градиент по управлению \mathbf{v} .

Условию усиленной псевдоградиентности удовлетворяют, например, функции

$$\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{\sigma}) = \Gamma_m \text{sign} \nabla_{\mathbf{v}} \mu(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{v}) \text{ при } \delta = 1, \beta = \frac{\lambda_{\min}(\Gamma_m)}{\sqrt{2}};$$

$$\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{\sigma}) = \Gamma_m \nabla_{\mathbf{v}} \mu(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{v}) \text{ при } \delta = 2, \beta = \lambda_{\min}(\Gamma_m),$$

где $\Gamma_m = \Gamma_m^T > 0$ — (2×2) -мерной матрицы усилителя; $\lambda_{\min}(\Gamma_m)$ — минимальное собственное значение Γ_m .

При $\mathbf{v}_0 = 0$, $\Gamma_m = \gamma_m \mathbf{I}$ получаем гладкие и релейные алгоритмы вида

$$\mathbf{v} = -\gamma_m \text{sign} \nabla_{\mathbf{v}} \mu(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{v}) = -\gamma_m \text{sign} \boldsymbol{\sigma}; \quad (24)$$

$$\mathbf{v} = -\gamma_m \nabla_{\mathbf{v}} \mu(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{v}) = -\gamma_m \boldsymbol{\sigma}. \quad (25)$$

Заметим, что алгоритм (24) относится к классу систем с настраиваемым скользящим режимом [6, 7].

Возвращаясь к исходному входному воздействию (силам), имеем

$$\mathbf{u}(t) = -\gamma_m \int_0^t \text{sign} \boldsymbol{\sigma}(\tau) d\tau,$$

$$\mathbf{u}(t) = -\gamma_m \int_0^t \boldsymbol{\sigma}(\tau) d\tau.$$

Структурная схема замкнутой системы представлена на рис. 1.

Теорема. Для системы (1), (2), (6), (8), (15), (18), (19), (23) справедливы утверждения:

1. При $\delta = 1$ существует $\bar{\gamma}_1 > 0$ такое, что при $\gamma_m > \bar{\gamma}_1$ цели управления (10), (22) достигаются при любых $\Delta_e > 0$, $\Delta_{\boldsymbol{\sigma}} > 0$, все траектории системы ограничены, $Q(\mathbf{e}) \rightarrow 0$ ($\mathbf{e} \rightarrow 0$) при $t \rightarrow \infty$. Существует момент времени t^* такой, что $R(\boldsymbol{\sigma}) \equiv 0$ ($\boldsymbol{\sigma} \equiv 0$) при $t \geq t^*$.

2. При $\delta > 1$ для любого $\Delta = \min\{\Delta_e, \Delta_{\boldsymbol{\sigma}}\} > 0$ существуют $\bar{\gamma}_2(\Delta) > 0$ такое, что при $\gamma_m > \bar{\gamma}_2$ цели управления (10), (22) достигаются при любых $\Delta_e > 0$, $\Delta_{\boldsymbol{\sigma}} > 0$, все траектории системы ограничены. При $\gamma_m \rightarrow \infty$ справедливо: $R(\boldsymbol{\sigma}) \rightarrow 0$, $Q(\mathbf{e}) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$.

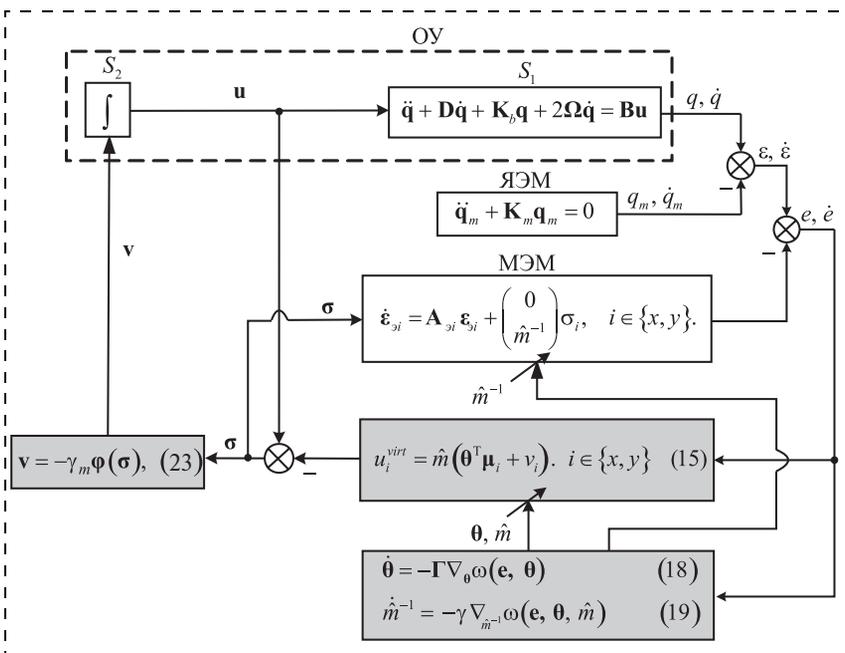


Рис. 1. Замкнутая адаптивная система управления

3. Существует функция Ляпунова вида

$$V(\mathbf{e}, \boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\theta}, \hat{m}) = Q(\mathbf{e}) + R(\boldsymbol{\sigma}) + 0,5\|\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_*\|_{\Gamma^{-1}}^2 + 0,5\gamma^{-1}\left(\frac{1}{m} - \frac{1}{\hat{m}}\right)^2, \quad (26)$$

где $\Gamma = \Gamma^T > 0$, $\gamma > 0$.

Достижение в силу теоремы целей управления (10), (22) с учетом замечания 1 означает достижения в замкнутой системе цели управления (3) при соответствующем выборе параметров ($\lambda_{jx} > 0$, $\lambda_{jy} > 0$, $j = 0, 1$) эталонной модели (8).

Доказательство теоремы. Определим производную по времени от функции Ляпунова (26) с учетом равенства (17), (21):

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \omega(\mathbf{e}, \boldsymbol{\theta}, \hat{m}) + (\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_*)^T \Gamma^{-1} \dot{\boldsymbol{\theta}} - \\ &- \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{\hat{m}}\right) \gamma^{-1} \dot{\hat{m}}^{-1} + \boldsymbol{\sigma}^T (\dot{\mathbf{u}} - \dot{\mathbf{u}}^{virt}) \leq \\ &\leq -\rho_x Q_x - \rho_y Q_y + (\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_*)^T \{\delta_x \boldsymbol{\mu}_x + \delta_y \boldsymbol{\mu}_y\} + \\ &+ \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{\hat{m}}\right) \{\delta_x u_x + \delta_y u_y\} + (\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_*)^T \Gamma^{-1} \dot{\boldsymbol{\theta}} - \\ &- \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{\hat{m}}\right) \gamma^{-1} \dot{\hat{m}}^{-1} + \boldsymbol{\sigma}^T (\mathbf{v} + \boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\tau}) = \\ &= -\rho Q + (\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_*)^T \{\delta_x \boldsymbol{\mu}_x + \delta_y \boldsymbol{\mu}_y + \Gamma^{-1} \dot{\boldsymbol{\theta}}\} + \\ &+ \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{\hat{m}}\right) \{\delta_x u_x + \delta_y u_y - \gamma^{-1} \dot{\hat{m}}^{-1}\} + \boldsymbol{\sigma}^T (\mathbf{v} + \boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\tau}). \end{aligned}$$

В силу алгоритмов адаптации (18), (19) получаем

$$\dot{V} \leq -\rho Q(\mathbf{e}) + \boldsymbol{\sigma}^T (\boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\tau}) + \boldsymbol{\sigma}^T \mathbf{v}. \quad (27)$$

Подставляя управление \mathbf{v} (23) в (27), получаем

$$\dot{V} \leq -\rho Q(\mathbf{e}) + \boldsymbol{\sigma}^T (\boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\tau} + \mathbf{v}_0) - \gamma_m \boldsymbol{\sigma}^T \boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{\sigma}).$$

Положим $\mathbf{v}_* = -\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\tau} - 0,5\rho_R \boldsymbol{\sigma}$, где $\rho_R > 0$. Тогда с учетом условия усиленной псевдоградиентности имеем

$$\dot{V} \leq -\rho Q(\mathbf{e}) - \rho_R R(\boldsymbol{\sigma}) + \boldsymbol{\sigma}^T (\mathbf{v}_0 - \mathbf{v}_*) - \gamma_m \beta \|\boldsymbol{\sigma}\|^\delta, \quad \beta > 0, \delta = 1, 2, \dots \quad (28)$$

Рассмотрим два случая: $\delta = 1$ и $\delta > 1$.

Пусть $\delta = 1$. С учетом равенства $\|\boldsymbol{\sigma}\| = \sqrt{2} \sqrt{R(\boldsymbol{\sigma})}$ (28) примет вид

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\rho Q(\mathbf{e}) - \rho_R R(\boldsymbol{\sigma}) + \boldsymbol{\sigma}^T (\mathbf{v}_0 - \mathbf{v}_*) - \gamma_0 \|\boldsymbol{\sigma}\| \leq \\ &\leq -\rho Q(\mathbf{e}) - \rho_R R(\boldsymbol{\sigma}) - \tilde{\gamma}_0 \sqrt{R}, \end{aligned} \quad (29)$$

где $\gamma_m \beta = \gamma_1 \beta + \gamma_0$; $\gamma_0 > 0$; $\tilde{\gamma}_0 = \sqrt{2} \gamma_0 > 0$; γ_1 удовлетворяет равенству $\gamma_1 \beta = \|\mathbf{v}_0 - \mathbf{v}_*\|$.

Интегрируя неравенство (29), получаем, что при любых ограниченных начальных условиях справедливо неравенство

$$\int_0^\infty \{-\rho Q(\mathbf{e}) - \rho_R R(\boldsymbol{\sigma}) - \tilde{\gamma}_0 \sqrt{R(\boldsymbol{\sigma})}\} dt \leq V(0) < \infty. \quad (30)$$

Докажем ограниченность траекторий замкнутой системы и равномерную ограниченность подынтегральной функции (30). Из неравенства (30) следует ограниченность $\mathbf{e}, \boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\theta}, \hat{m}^{-1}$. Из ограниченности траекторий эталонной модели $\mathbf{q}_m = (x_m \ y_m)^T$, $\dot{\mathbf{q}}_m, \boldsymbol{\varepsilon}_\varepsilon$ и $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_\varepsilon$ следуют ограниченность $\mathbf{q} = (x \ y)^T$, $\dot{\mathbf{q}}$. Из ограниченности $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \boldsymbol{\theta}$ и \hat{m} (при $\hat{m}(0) > 0$) в силу соотношения (15) следует ограниченность u_i^{virt} . Из ограниченности u_i^{virt} и σ_i в силу формулы (6) следует ограниченность u_x, u_y . Тогда из ограниченности правой части системы (11) следует ограниченность $\dot{\mathbf{e}}$.

Из ограниченности $\dot{\mathbf{e}}$, с учетом ограниченности $\ddot{\mathbf{q}}_m$, следует ограниченность $\ddot{\mathbf{q}}$. Из анализа правой части уравнений (18), (19) следует ограниченность $\dot{\boldsymbol{\theta}}, \dot{\hat{m}}$. Из ограниченности $\dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}_m, \dot{\mathbf{q}}_m, \boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \hat{m}, \dot{\hat{m}}$ следует ограниченность $\boldsymbol{\tau}$. Из ограниченности $\mathbf{v}, \boldsymbol{\tau}$ и $\|\boldsymbol{\eta}(t)\| \leq C_\eta$ следует ограниченность $\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{v} + \boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\tau}$.

Ограниченность $\dot{\boldsymbol{\sigma}}$ и $\dot{\mathbf{e}}$ приводит к равномерной непрерывности $\boldsymbol{\sigma}(t)$ и $\mathbf{e}(t)$ соответственно. Следовательно, подынтегральная функция в неравенстве (30) равномерно непрерывна. Тогда из леммы Барбалата [10] следует $Q(\mathbf{e}) \rightarrow 0, R(\boldsymbol{\sigma}) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$. Из квадратичного вида $Q(\mathbf{e})$ и $R(\boldsymbol{\sigma})$ следует $\mathbf{e}(t) \rightarrow 0, \boldsymbol{\sigma}(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$.

Из неравенства (29) вытекает возможность более быстрой сходимости $R(\boldsymbol{\sigma}) \rightarrow 0$ по отношению к $Q(\mathbf{e}) \rightarrow 0$. Рассмотрим вопрос о сходимости к пересечению гиперповерхностей $\boldsymbol{\sigma} \equiv 0$ более подробно. Вновь вернемся к равенству (21). При выбранном в неравенстве (29) коэффициенте усиления $\gamma_m \beta$ получаем

$$\dot{R} \leq -\rho_R R(\boldsymbol{\sigma}) - \tilde{\gamma}_0 \sqrt{R(\boldsymbol{\sigma})} \leq -\tilde{\gamma}_0 \sqrt{R(\boldsymbol{\sigma})}.$$

Интегрируя последнее неравенство, получаем

$\sqrt{R(\boldsymbol{\sigma}(t))} \leq \sqrt{R(\boldsymbol{\sigma}(0))} - \frac{\tilde{\gamma}_0}{2} t$. В левой части неравенства — неотрицательная функция, в правой части — линейно убывающая функция, следовательно, существует момент времени t^* такой, что $R(\boldsymbol{\sigma}(t^*)) = 0$,

и справедлива оценка $t^* \leq \frac{2}{\tilde{\gamma}_0} \sqrt{R(\boldsymbol{\sigma}(0))}$. Таким образом, в замкнутой системе возникает настраиваемый скользящий режим и $\boldsymbol{\sigma}(t) \equiv 0$ при $t \geq t^*$. При этом в скользящем режиме справедливы оценки

$$Q(\mathbf{e}(t)) \leq Q(\mathbf{e}(t^*)) - \int_{t^*}^t \rho Q dt \text{ и } \mathbf{u}(t) = \mathbf{u}^{virt}(t) \text{ при } t \geq t^*.$$

Для случая $\delta = 1$ теорема доказана.

Рассмотрим случай $\delta = 2$. Из неравенства (28) получаем

$$\dot{V} \leq -\rho Q(\mathbf{e}) - \rho_R R(\boldsymbol{\sigma}) + d \|\boldsymbol{\sigma}\| - \gamma_m \beta \|\boldsymbol{\sigma}\|^\delta, \quad (31)$$

где $d \triangleq \|\mathbf{v}_0 - \mathbf{v}_*\|$.

Для фиксированного Δ :

$$0 < \Delta < V_0 = Q(\mathbf{e}(0)) + R(\boldsymbol{\sigma}(0)) + 0,5\|\boldsymbol{\theta}(\mathbf{0}) - \boldsymbol{\theta}_*\|_{\Gamma^{-1}}^2 + 0,5\gamma^{-1}\left(\frac{1}{m} - \frac{1}{\hat{m}}\right)^2$$

положим

$$\bar{\rho}_1(\Delta) = \inf_{Q(\mathbf{e}) > \Delta} \rho Q(\mathbf{e}),$$

$$\bar{\rho}_2(\Delta) = \inf_{R(\boldsymbol{\sigma}) > \Delta} \rho R(\boldsymbol{\sigma}), \quad \bar{d} = \sup_{\Omega_0} d,$$

где

$$\Omega_0 = \cup((\mathbf{e}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\sigma}): Q(\mathbf{e}) + R(\boldsymbol{\sigma}) + 0,5\|\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_*\|_{\Gamma^{-1}}^2 + 0,5\gamma_p^{-1}\left(\frac{1}{m} - \frac{1}{\hat{m}}\right)^2 \leq V_0).$$

Тогда из неравенства (31) получаем

$$\dot{V} \leq -\bar{\rho}_1(\Delta) - \bar{\rho}_2(\Delta) + \bar{d}\|\boldsymbol{\sigma}\| - \gamma_m\beta\|\boldsymbol{\sigma}\|^\delta.$$

Максимизируя последние два слагаемых по $\|\boldsymbol{\sigma}\|$, получаем

$$\max_{\|\boldsymbol{\sigma}\|} (\bar{d}\|\boldsymbol{\sigma}\| - \gamma_m\beta\|\boldsymbol{\sigma}\|^\delta): \bar{d} - \delta\gamma_m\beta\|\boldsymbol{\sigma}\|^{\delta-1} = 0 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \|\boldsymbol{\sigma}\| = \left(\frac{\bar{d}}{\delta\gamma_m\beta}\right)^{\frac{1}{\delta-1}}.$$

Тогда

$$\dot{V} \leq -\bar{\rho}_1(\Delta) - \bar{\rho}_2(\Delta) + \bar{d}\frac{\delta-1}{\delta}\left(\frac{\bar{d}}{\delta\gamma_m\beta}\right)^{\frac{1}{\delta-1}}. \quad (32)$$

В силу неравенства (32) для достаточно большого γ_m существуют $\varepsilon_0 > 0$ и $\varepsilon_1 > 0$ такие, что при $\gamma_m > \gamma_2$ неравенство $\dot{V} \leq -\varepsilon_0$ будет выполняться, если будут выполняться неравенства

$$\Delta - \varepsilon_1 \leq Q + R \leq V_0, \quad (33)$$

где Q, R — значения функционалов в момент времени t .

Левая часть неравенства (33) не может выполняться в течение времени, большего, чем V_0/ε_0 . Неравенство $Q + R \leq V_0$ не может нарушиться, так как $V \leq V_0$.

Поэтому существует такой момент времени $\tau > 0$, что

$$Q + R \leq \Delta - \varepsilon_1 \quad (34)$$

и, следовательно, при любом $t > \tau$ множество $G_t = \{s: s < t, Q + R \leq \Delta - \varepsilon_1\}$ непустое. Выберем $\tau_t = \sup G_t$. Функции $\rho Q > 0, \rho R > 0$ при любых $Q \neq 0, R \neq 0$, следовательно, $\bar{\rho}_1(\Delta) > 0, \bar{\rho}_2(\Delta) > 0$ при любом $\Delta > 0$. Выберем $\Delta = \min\{\Delta_e, \Delta_\sigma\}$. В силу (34) $Q(\mathbf{e}) \leq \Delta - \varepsilon_1 < \Delta_e, R(\boldsymbol{\sigma}) \leq \Delta - \varepsilon_1 < \Delta_\sigma$ при любом $t > \tau_t$. Заметим, что из соотношения (32) следует, что при $\gamma_m \rightarrow \infty$ послед-

ние два слагаемые правой части неравенства (31) стремятся к нулю и, как следствие, $R(\boldsymbol{\sigma}) \rightarrow 0, Q(\mathbf{e}) \rightarrow 0$ ($\boldsymbol{\sigma} \rightarrow 0, \mathbf{e} \rightarrow 0$) при $t \rightarrow \infty$.

Наконец, ограниченность траекторий $\mathbf{e}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\theta}, \hat{m}^{-1}, \boldsymbol{\sigma}$ вытекает из условия $\dot{V} \leq 0$ (на траекториях системы, где не выполняются целевые неравенства (10), (22)).

В предельном случае ($\gamma_m \rightarrow \infty$) из неравенства (31) следует $\dot{V} \leq -\rho Q(\mathbf{e}) - \rho R(\boldsymbol{\sigma})$ и, как следствие, ограниченность траектории системы и достижение целей управления $R(\boldsymbol{\sigma}) \rightarrow 0, Q(\mathbf{e}) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$. Для случая $\delta > 1$ теорема доказана.

Идентифицирующие свойства

Анализ идентифицирующих свойств показывает, что θ_4 — оценка угловой скорости (Ω_z) и \hat{m} линейно связаны (не отделимы при идентификации). Поэтому предполагается следующий алгоритм решения задачи:

1. Проведение стендовых испытаний на оборудовании, имитирующем заданную угловую скорость вращения основания виброгироскопа Ω_z на этапе завершения технологического цикла изготовления вибрационного гироскопа. При этом следует:

- в алгоритме виртуального управления (15) положить $\theta_4 = \Omega_z$;
- отключить алгоритм адаптации по параметру θ_4 в алгоритме (18);

- оценить в процессе стендовых испытаний массу чувствительного элемента виброгироскопа (\hat{m}) и, при необходимости контроля технологического разброса параметров изготовления, оценить $\theta_i, i = 1, 7, i \neq 4$.

2. На этапе эксплуатации гироскопа, руководствуясь законом сохранения массы, использовать в алгоритме виртуального управления ранее полученную оценку массы (\hat{m}) с отключением алгоритма адаптации (19) и с включением алгоритма адаптации (18) (с настройкой $\theta_i, i = 1, 7$).

Результаты математического моделирования

В работах [2—4] отмечалось, что основное влияние на точность измерения скорости вращения оказывают перекрестные связи вибрационного гироскопа. Поэтому будем проводить идентификацию по параметрам $\theta_2, \theta_4, \theta_6$ (оценивание $d_{xy}, \Omega_z, \omega_{xy}$) и \hat{m} .

Параметры $d_{xx}, d_{yy}, \omega_x^2, \omega_y^2$ считаются известными.

Моделирование проводили при $x_m = 0,3\cos\omega_x^*t, y_m = 0,5\sin\omega_y^*t, \boldsymbol{\eta}^T = (0,8\sin(20(2\pi t)) \ 0,8\cos(20(2\pi t)))$.

Параметры моделирования приведены в таблице.

Параметры объекта управления

m	$\omega_x^* = \omega_y^*$	d_{xx}	d_{xy}	d_{yy}	ω_x	ω_{xy}	ω_y	Ω_z
10^{-8} кг	1 кГц	0,05	0,005	0,06	1,05	0,01	0,97	5

Результаты математического моделирования системы управления с модифицированной эталонной моделью (8) и релейным алгоритмом управления (24) получены при $\gamma_m = 6$, $\gamma_2 = 4,5$, $\gamma_4 = 8$, $\gamma_6 = 3$, $\gamma = 0,1$.

Результаты математического моделирования 1-го этапа идентификации ($\theta_4 = \Omega_z^*$) представлены

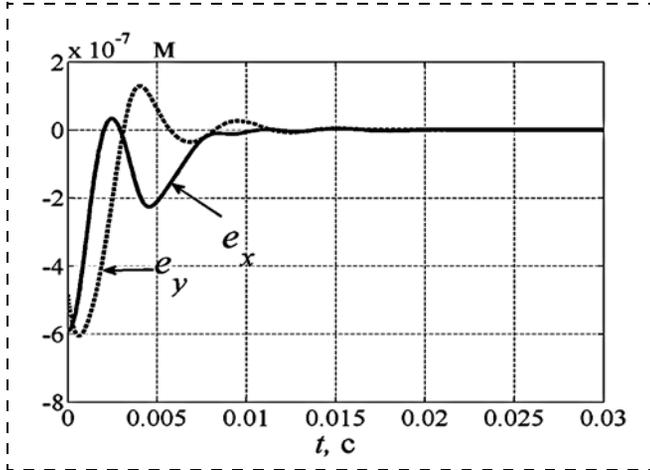


Рис. 2. Ошибки слежения с модифицированной эталонной моделью

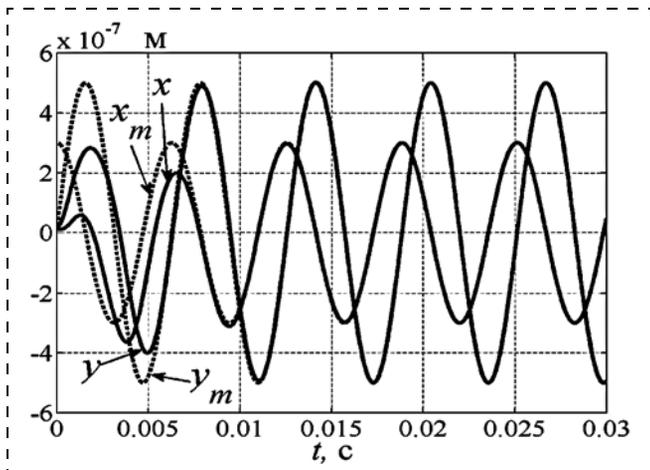


Рис. 3. Траектории объекта и эталонной модели

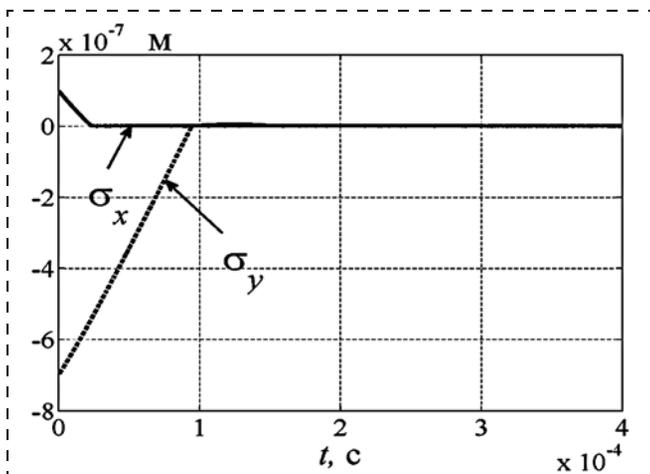


Рис. 4. Отклонения от многообразия скольжения

ны на рис. 2—8, где наблюдается хорошая сходимость траектории объекта управления к желаемым колебаниям чувствительного элемента, достаточно быстрый выход на многообразие скольжения, хорошие идентифицирующие свойства по \hat{m} , θ_2 , θ_6 .

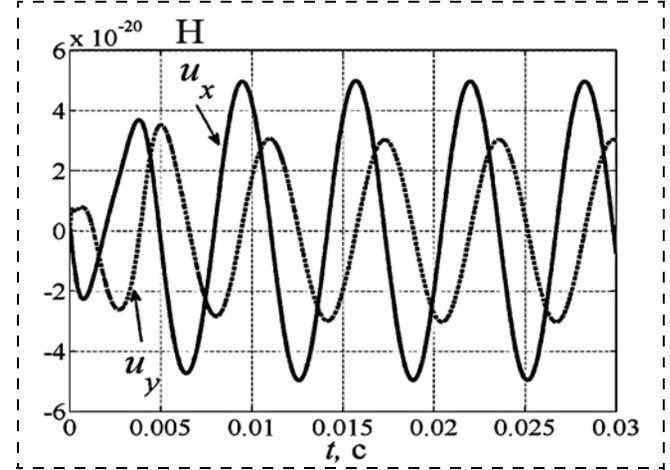


Рис 5. Входы выходного каскада

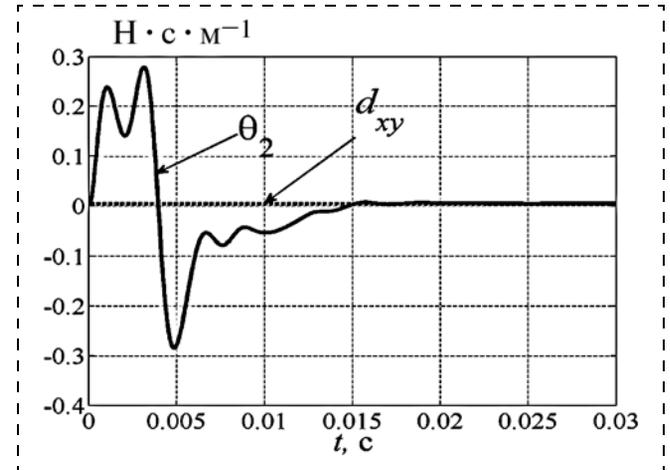


Рис. 6. Результаты идентификации параметра d_{xy}

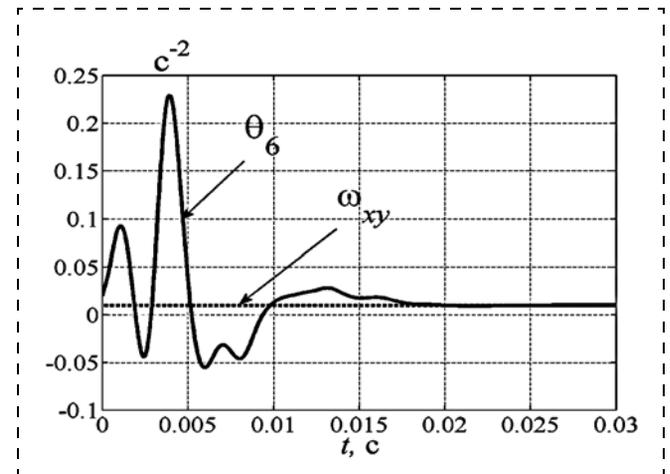


Рис. 7. Результаты идентификации параметра ω_{xy}

Результаты математического моделирования 2-го этапа идентификации ($\hat{m} = m$) представлены на рис. 9—15, где наблюдается хорошая сходимость траектории объекта управления к желаемым колебаниям чувствительного элемента, достаточно бы-

стрый выход на многообразие скольжения, хорошие идентифицирующие свойства по $\theta_2, \theta_4, \theta_6$.

По сравнению с алгоритмами адаптивного управления с эталонной моделью [1] алгоритмы с модифицированной эталонной моделью обеспечивают

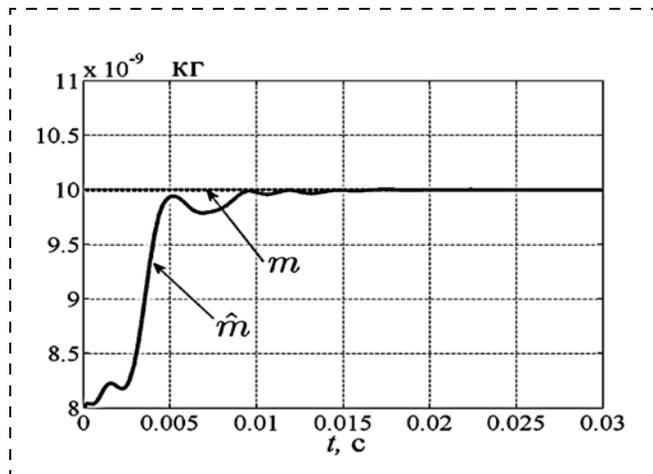


Рис. 8. Результаты идентификации параметра m

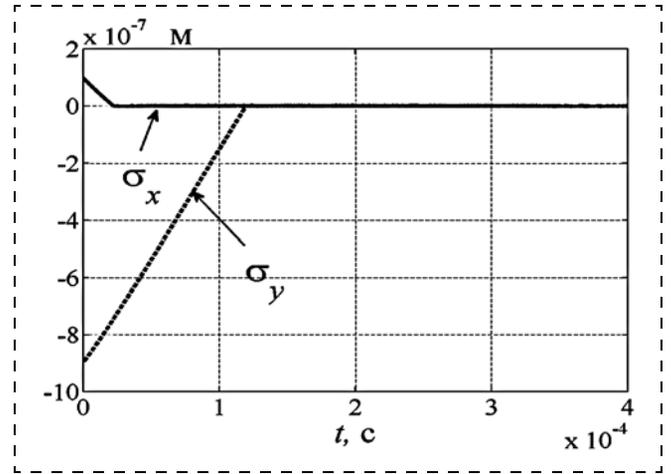


Рис. 11. Отклонения от многообразия скольжения

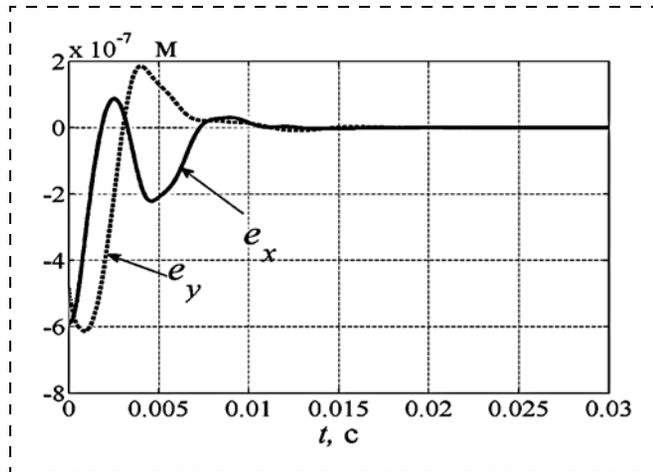


Рис. 9. Ошибки слежения с модифицированной эталонной моделью

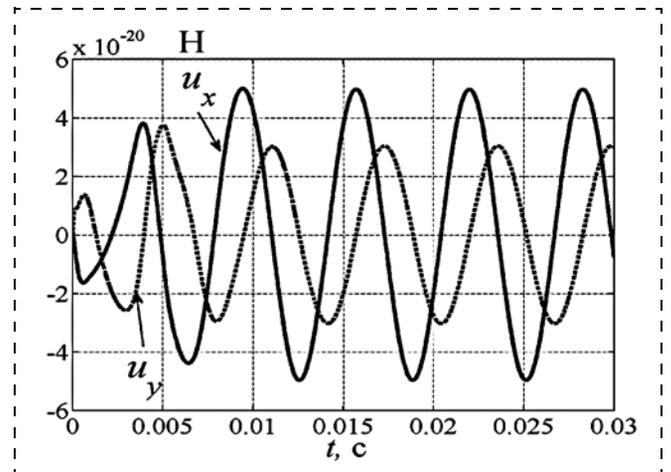


Рис. 12. Входы выходного каскада

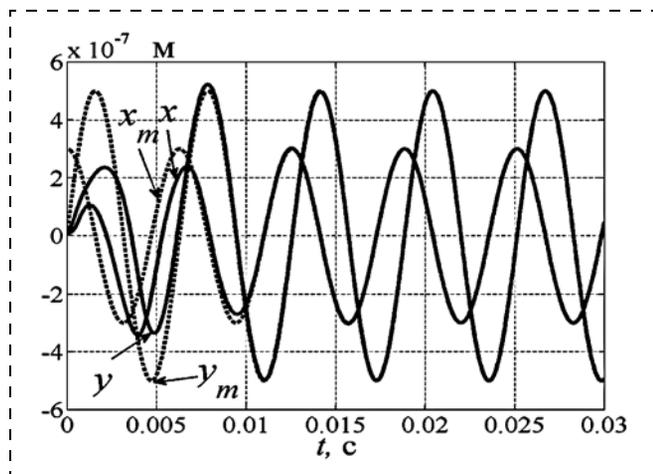


Рис. 10. Траектории объекта и эталонной модели

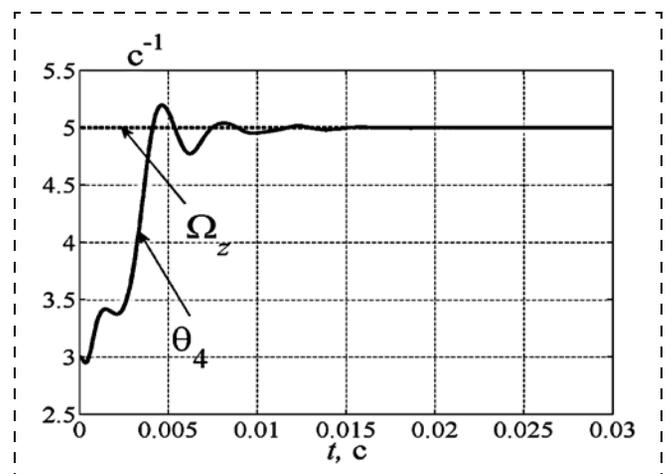


Рис. 13. Результаты идентификации угловой скорости Ω_z

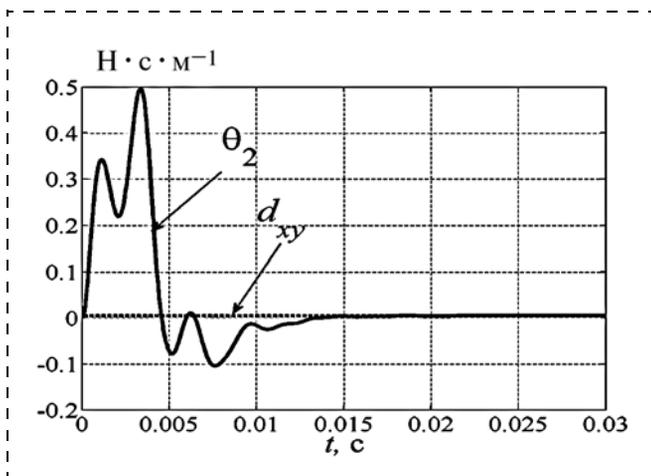


Рис. 14. Результаты идентификации параметра d_{xy}

сходные показатели качества движения чувствительного элемента и оценивания параметров при меньших коэффициентах усиления релейного управления (на 25 %) и коэффициентах усиления в алгоритме адаптации (18).

Заключение

В работе представлены результаты синтеза алгоритмов управления вибрационным гироскопом с модифицированной эталонной моделью. Анализ сходимости замкнутой системы показывает, что введение в эталонную модель слагаемого, пропорционального отклонению траектории системы от многообразия скольжения (невязки между входом механической подсистемы и адаптивным виртуальным управлением), позволяет снизить энергетические затраты на управление. Введение адаптации в модифицированную модель улучшает динамику идентификации неизвестных параметров вибрационного гироскопа и позволяет дополнительно оценивать массу чувствительного элемента.

Гладкий алгоритм адаптивного управления обеспечивает сколь угодно высокую точность по ошибке слежения за желаемой траекторией чувствительного элемента и предельное асимптотическое стремление к нулю при бесконечно большом коэффициенте усиления по каналам управления ($\gamma_m \rightarrow \infty$).

Релейный алгоритм адаптивного управления (настраиваемый скользящий режим) обеспечивает асимптотическое стремление ошибок к нулю при конечном коэффициенте усиления при релейных элементах по каналам управления. В основе синтеза гладкого и релейного алгоритма лежит единая функция Ляпунова. Поэтому алгоритмы легко комбинируются в виде их суммы или системы переменной структуры.

Одновременная оценка массы чувствительного элемента (\hat{m}) и скорости вращения основания гироскопа (θ_4) оказалась невозможной. Попытка улуч-

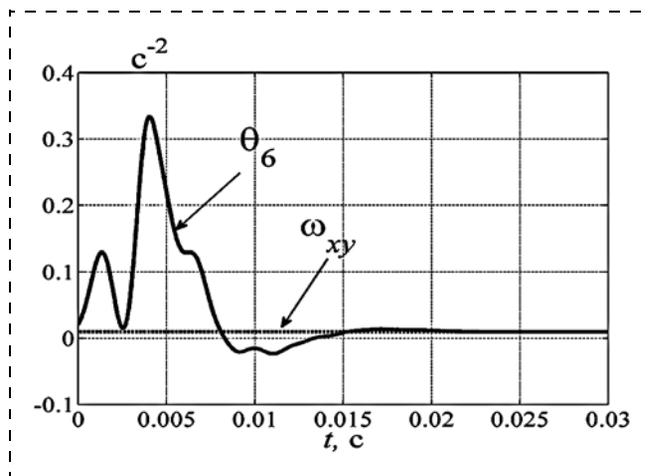


Рис. 15. Результаты идентификации параметра ω_{xy}

шения идентифицирующих свойств за счет обогащения спектра входного сигнала механической подсистемы и модифицированной модели не дала положительного эффекта. Поэтому в работе предложен вариант решения проблемы с предварительной оценкой массы чувствительного элемента на этапе заводских испытаний.

Список литературы

1. Мышляев Ю. И., Финошин А. В., Тар Яр Мьо. Метод скоростного биградиента в задаче управления вибрационным гироскопом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 11. С. 783–792.
2. Hameed S., Jagannathan. Adaptive force-balancing control of MEMS gyroscope with actuator limits // Proc. of the 2004 American Control Conference. 2004. Vol. 2. P. 1862–1867.
3. Fei J., Batur C. A novel adaptive sliding mode control for MEMS gyroscope // Proc. of 47th IEEE Conference on Decision and Control. 2007.
4. Мышляев Ю. И., Финошин А. В., Тар Яр Мьо. Адаптивное управление одноосным вибрационным гироскопом с интегратором // XII Всероссийское совещание по проблемам управления, Россия, Москва, ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН, 16–19 июня 2014 г. С. 2246–2256.
5. Мышляев Ю. И. Метод бикоростного градиента // Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. Вып. 5. Ч. 1. С. 168–178.
6. Мышляев Ю. И. Алгоритмы управления линейными объектами в условиях параметрической неопределенности на основе настраиваемого скользящего режима // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 2. С. 11–16.
7. Myshlyayev Y. I., Finoshin A. V. Sliding mode with tuning surface in problem of synchronization of two-pendulum system motion // 11th IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing. University of Caen Basse-Normandie, Caen, France, July 3–5, 2013. P. 221–226.
8. Фрадков А. Л. Адаптивное управление в сложных системах. М.: Наука, 1990.
9. Фрадков А. Л. Схема скоростного градиента в задачах адаптивного управления // Автоматика и телемеханика. 1979. № 9. С. 90–101.
10. Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000.
11. Myshlyayev Y. I., Finoshin A. V., Tar Yar Myo. Sliding mode with tuning surface control for MEMS vibratory gyroscope // 6th Internat. Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), St. Petersburg, Russia, October 6–8, 2014. P. 360–365.

Speed Bigradient Algorithms with a Modified Reference Model in the Control Problem of a Vibratory Gyroscope

Yu. I. Myshlyayev, uimysh@mail.ru✉, Tar Yar Myo, brightxstar@gmail.com,
Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 248000, Russian Federation

Corresponding author: Myshlyayev Yury I., Ph. D., Associate Professor,
Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 248000, Russian Federation,
e-mail: uimysh@mail.ru

Received on July 30, 2015

Accepted on August 07, 2015

The article is devoted to the task of adaptive control of a single-axis vibratory gyroscope with a modified reference model of the desired dynamics of the mechanical subsystem. In order to enhance the astatism of the system and ensure smoothness of the controlling forces, additional integrators are connected to the gyroscope inputs. The smooth control algorithms and the algorithms of the sliding mode with a tuning surface for the system with integrator were designed by the speed bi-gradient method. Synthesis of the control algorithms based on employment of an additional modified reference model for the trajectory tracking error of the reference model was proposed. A modified model was selected in the form of a linear Hurwitz system with an input proportional to the discrepancy between the output of the input cascade and the virtual control of the gyroscope. The purposes of the modification were improvement of the identifying properties and reduction of the energy consumption for control. These goals were achieved by a structural correspondence of the model error and modified reference model not only on the intersections of the hypersurfaces (the discrepancy was identically equal to zero), but also outside of them. Note, that entry of a discrepancy either in the unstable reference model of oscillation or in a virtual control does not allow achievement of the specified goal. The design procedure, condition of the applicability, stability analysis of the adaptive control system and the robustness were presented. The theoretical results were proved by a closed-loop system simulation in MATLAB.

Keywords: high-speed bigradient method, tunable sliding mode, vibratory gyroscope, stability, Lyapunov function, robustness, modified reference model

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Government of Kaluga Region, project no. 14-48-03115.

For citation:

Myshlyayev Yu. I., Tar Yar Myo. Speed Bigradient Algorithms with a Modified Reference Model in the Control Problem of a Vibratory Gyroscope, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 17, no. 1, pp. 47–56.

DOI: 10.17587/mau/16.47-56

References

1. Myshlyayev Y. I., Finoshin A. V., Tar Yar Myo. Metod skorostnogo bigradienta v zadache upravleniya vibratsionnym giroskopom (Speed bigradient method in the control problem of vibratory gyroscope), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 11, pp. 783–792 (in Russian).
2. Hameed S., Jagannathan. Adaptive force-balancing control of MEMS gyroscope with actuator limits, *Proceedings of the 2004 American Control Conference*, 2004, vol. 2, pp. 1862–1867.
3. Fei J., Batur C. A novel adaptive sliding mode control for MEMS gyroscope, *Proceeding of 47th IEEE Conference on Decision and Control*, 2007.
4. Myshlyayev Y. I., Finoshin A. V., Tar Yar Myo. Adaptivnoe upravlenie odnoosnym vibratsionnym giroskopom s integratorom (Adaptive control of a single-axis vibrating gyroscope with an integrator), *XII All-Russian Conference on Control Problems*, Russia, Moscow, Institute of Control of the VA Trapeznikova RAS, June 16–19, 2014. pp. 2246–2256 (in Russian).
5. Myshlyayev Y. I. Metod biskorostnogo gradienta (Speed bigradient method), *Proceedings of the TSU. Technical sciences*, 2011. vol. 5, part 1, pp. 168–178 (in Russian).
6. Myshlyayev Y. I. Algoritmy upravleniya lineinymi ob"ektami v usloviyakh parametriceskoi neopredelennosti na osnove nastraivaemogo skol'z'yashchego rezhima (Linear system control algorithms in the case of parameter variations by sliding mode with tuning surface), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2009, no. 2, pp. 11–16 (in Russian).
7. Myshlyayev Y. I., Finoshin A. V. Sliding mode with tuning surface in problem of synchronization of two-pendulum system motion, *11th IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing*, University of Caen Basse-Normandie, Caen, France, July 3–5, 2013, pp. 221–226.
8. Fradkov A. L. Adaptivnoe upravlenie v slozhnykh sistemakh (Adaptive control in complex systems), Moscow, Nauka, 1990 (in Russian).
9. Fradkov A. L. Skhema skorostnogo gradienta v zadachakh adaptivnogo upravleniya (Speed-gradient scheme and its applications in adaptive control), *Automation and Remote Control*, 1979, 40 (9), pp. 1333–1342 (in Russian).
10. Miroshnik I. V., Nikiforov V. O., Fradkov A. L. Nelineinoe i adaptivnoe upravlenie slozhnymi dinameshskimi sistemami (Nonlinear and adaptive control of complex dynamic systems), St. Petersburg, Nauka, 2000 (in Russian).
11. Myshlyayev Y. I., Finoshin A. V., Tar Yar Myo. Sliding mode with tuning surface control for MEMS vibratory gyroscope, *6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, St. Petersburg, Russia, October 6–8, 2014, pp. 360–365.

Н. Е. Зубов^{1, 2}, д-р техн. наук, проф., nikolay.zubov@rsce.ru,
М. В. Ли², аспирант, marat.li@rsce.ru, **Е. К. Ли**¹, аспирант, elen.k.lee@student.bmstu.ru,
Е. А. Микрин^{1, 2}, д-р техн. наук, акад. РАН, eugeny.mikrin@rsce.ru,
В. Н. Рябченко^{1, 2}, д-р техн. наук, проф., rvp@mes-centra.ru

¹Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,

²ОАО "Ракетно-космическая корпорация "Энергия" им. С. П. Королева

Алгоритм синтеза терминального управления выставкой космического аппарата в инерциальную систему координат¹

Получен алгоритм синтеза терминального управления выставкой космического аппарата в инерциальную систему координат. Алгоритм основан на определении программных значений компонент вектора угловой скорости и решении задач их стабилизации, а также достижения требуемой конечной ориентации космического аппарата. Приведены в детерминированной постановке результаты математического моделирования, показывающие успешную работу предлагаемого алгоритма и высокую точность терминального управления для широкого диапазона начальных условий выполнения маневра.

Ключевые слова: инерциальная ориентация, математическая модель космического аппарата, терминальное управление, синтез программных значений угловой скорости

Введение

Управление выставкой космического аппарата (КА) является одним из основополагающих маневров при управлении его угловым движением. В ходе этого процесса, именуемого в дальнейшем построением ориентации, происходит совмещение связанной системы координат (ССК) КА с заданной системой координат или, в рассматриваемом случае, с инерциальной системой координат (ИСК).

При терминальном построении инерциальной ориентации КА управление изменяется в зависимости от участка маневра: разгон, движение с постоянной скоростью, торможение. Используя кинематическую постановку задачи, можно достаточно легко получить в реальном масштабе времени программную траекторию построения инерциальной ориентации КА для участков разгона и движения с постоянной скоростью, а также построить алгоритм ее стабилизации. Синтез управления на участке торможения рассматривается отдельно ввиду необходимости стабилизации требуемой конечной ориентации КА.

Таким образом, в зависимости от участков совершения маневра задача терминального построения инерциальной ориентации может быть сведена к синтезу программных значений вектора угловой скорости, обеспечивающих процесс построения ориентации за заданное время (в кинематической постановке), расчету значений вектора управляющего момента и его стабилизации для участков разгона и движения с постоянной скоростью, а также к синтезу тормозных управляющих моментов с последующей стабилизацией требуемой ориентации для участка торможения.

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского национального фонда (проект № 14-11-00046).

Решению данной задачи построения ориентации КА за заданное время в ИСК и посвящена данная статья.

Кинематические уравнения вращательного движения КА

Для описания процесса управления ориентацией КА будем использовать кинематические уравнения вращательного движения в параметрах Родрига — Гамильтона [1, 2]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\lambda}_0 \\ \dot{\lambda}_1 \\ \dot{\lambda}_2 \\ \dot{\lambda}_3 \end{bmatrix} = 0,5 \begin{bmatrix} -\lambda_1 \omega_x - \lambda_2 \omega_y - \lambda_3 \omega_z \\ \lambda_0 \omega_x + \lambda_2 \omega_z - \lambda_3 \omega_y \\ \lambda_0 \omega_y + \lambda_3 \omega_x - \lambda_1 \omega_z \\ \lambda_0 \omega_z + \lambda_1 \omega_y - \lambda_2 \omega_x \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Здесь $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ — компоненты угловой скорости КА относительно инерциального пространства; $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ — компоненты кватерниона.

Аналитическое решение системы (1) при постоянных значениях $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ имеет следующий "спиральный" вид [2]:

$$\begin{bmatrix} \lambda_0(t_k) \\ \lambda_1(t_k) \\ \lambda_2(t_k) \\ \lambda_3(t_k) \end{bmatrix} = \left(\cos \frac{\omega T}{2} \mathbf{I}_4 + \frac{1}{\omega} \sin \frac{\omega T}{2} \mathbf{A} \right) \begin{bmatrix} \lambda_0(t) \\ \lambda_1(t) \\ \lambda_2(t) \\ \lambda_3(t) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $\omega = \sqrt{\omega_x^2(t) + \omega_y^2(t) + \omega_z^2(t)}$; $t \in (t_k - t_0)$ — текущее время $T = t_k - t$, t_0, t_k — время начала и окончания переориентации; \mathbf{I}_4 — единичная матрица 4-го порядка;

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix}.$$

Синтез программных значений вектора угловой скорости

Введем обозначение $\mathbf{x}(\tau) = [\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]^T$ и запишем выражение (2) следующим образом в матричной форме:

$$\mathbf{x}(t_k) = \mathbf{G}(t, \boldsymbol{\omega}, t_k) \mathbf{x}_x(t). \quad (3)$$

Здесь $\mathbf{G}(t, \boldsymbol{\omega}, t_k) = \cos \frac{\omega T}{2} \mathbf{I}_4 + \frac{1}{\omega} \sin \frac{\omega T}{2} \mathbf{A}$; $\boldsymbol{\omega} = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]$.

Построим (условную) дискретную систему следующего вида:

$$\mathbf{x}_p^D(\tau + 1) = \mathbf{A}_p^D \mathbf{x}_p^D(\tau), \mathbf{y}(\tau) = \mathbf{C}_p \mathbf{x}_p^D(\tau), \quad (4)$$

где $\tau = 0, 1, 2, \dots, N$ — дискретное время, определяемое на основе ввода на отрезке времени управления $t \in [t_0, t_k]$ равномерной сетки из N интервалов с шагом $h = (t_k - t_0)/N$, так что $t_\tau = t_0 + \tau h$ и $t_N = t_k$. Прогнозируемый расширенный вектор $\mathbf{x}_p^D(\tau)$ включает векторы $\mathbf{x}(\tau)$ и $\boldsymbol{\omega}$, при этом матрицы в соотношении (4) имеют вид

$$\mathbf{A}_p^D = \mathbf{I}_{(n+m) \times (n+m)}, \mathbf{C}_p = [\mathbf{I}_n \times n \mid 0_n \times m]. \quad (5)$$

Построим для системы (4) наблюдатель состояния полного ранга. В общем виде он определяется уравнением [3]

$$\hat{\mathbf{x}}_p^D(\tau + 1) = (\mathbf{A}_p^D - \mathbf{L}_p \mathbf{C}_p) \hat{\mathbf{x}}_p^D(\tau) + \mathbf{L}_p \mathbf{y}(\tau), \quad (6)$$

Оценка $\hat{\mathbf{x}}(t_k)$ запишется следующим образом:

$$\hat{\mathbf{x}}(t_k) = \mathbf{G}(t, \boldsymbol{\omega}, t_k) \mathbf{x}(t). \quad (7)$$

Линеаризуем функцию $\mathbf{G}(t, \boldsymbol{\omega}, t_k)$ в окрестности $\hat{\boldsymbol{\omega}}$, используя разложение в ряд Тейлора. В результате будем иметь

$$\mathbf{G}(t, \boldsymbol{\omega}, t_k) = \mathbf{G}(t, \hat{\boldsymbol{\omega}}, t_k) + \frac{\partial \mathbf{G}(t, \hat{\boldsymbol{\omega}}, t_k)}{\partial \boldsymbol{\omega}} \tilde{\boldsymbol{\omega}}, \quad (8)$$

где $\frac{\partial \mathbf{G}(t, \hat{\boldsymbol{\omega}}, t_k)}{\partial \boldsymbol{\omega}}$ — матрица Якоби, $\tilde{\boldsymbol{\omega}} = \boldsymbol{\omega} - \hat{\boldsymbol{\omega}}$. Вы-

числяя далее вектор невязок $\tilde{\mathbf{x}}$, получим

$$\tilde{\mathbf{x}}(\tau + 1) = \frac{\partial \mathbf{G}(t, \hat{\boldsymbol{\omega}}, t_k)}{\partial \boldsymbol{\omega}} \tilde{\boldsymbol{\omega}}(\tau). \quad (9)$$

Объединим $\tilde{\mathbf{x}}$ и $\tilde{\boldsymbol{\omega}}$ в единый вектор и, используя (6), с учетом (4) получим дискретную модель уравнения невязок

$$\tilde{\mathbf{x}}_p(\tau + 1) = (\mathbf{A}_p^D - \mathbf{L}_p \mathbf{C}_p) \tilde{\mathbf{x}}_p(\tau), \quad (10)$$

где

$$\mathbf{A}_p^D = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{n \times n} & \frac{\partial \mathbf{G}(t, \hat{\boldsymbol{\omega}}, t_k)}{\partial \boldsymbol{\omega}} \\ 0 & \mathbf{I}_{m \times m} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

При выполнении условия полной наблюдаемости Калмана

$$\text{rank} \begin{bmatrix} \mathbf{C}_p \\ \mathbf{C}_p \mathbf{A}_p^D \\ \vdots \\ \mathbf{C}_p (\mathbf{A}_p^D)^{n+m-1} \end{bmatrix} = n + m \quad (12)$$

выбором матрицы коэффициентов \mathbf{L}_p при известных матрицах \mathbf{A}_p^D и \mathbf{C}_p всегда можно обеспечить любое заданное размещение внутри круга единичного радиуса на комплексной плоскости \mathbb{C}^{stab} корней характеристического полинома (полюсов) [4]

$$\det(\lambda \mathbf{I}_n - \mathbf{A}_p^D + \mathbf{L}_p \mathbf{C}_p) \quad (13)$$

или, что эквивалентно, собственных значений (eig) матрицы наблюдателя состояния

$$\begin{aligned} \text{eig}(\mathbf{A}_p^D - \mathbf{L}_p \mathbf{C}_p) &= \\ &= \{\lambda_i \in \mathbb{C}^{stab} : \det(\lambda \mathbf{I}_n - \mathbf{A}_p^D + \mathbf{L}_p \mathbf{C}_p) = 0\}. \end{aligned} \quad (14)$$

В этом случае можно рассмотреть вспомогательную дискретную ММО-систему следующего вида [3]:

$$\mathbf{v}(\tau + 1) = \bar{\mathbf{A}} \mathbf{v}(\tau) + \bar{\mathbf{B}} \boldsymbol{\eta}(\tau), \boldsymbol{\eta}(\tau) = -\mathbf{L}_p^T \mathbf{v}(\tau), \quad (15)$$

где \mathbf{v} — вектор, имеющий размерность расширенного вектора \mathbf{x}_p ; $\boldsymbol{\eta}_T$ — вектор входа (управления); $\bar{\mathbf{A}} = (\mathbf{A}_p^D)^T$, $\bar{\mathbf{B}} = \mathbf{C}_p^T$.

Поиск матрицы \mathbf{L}_p в соотношении (15), обеспечивающей заданное размещение полюсов (собственных значений), относится к классической задаче модального управления, а в данном случае, по сути, к задаче терминального управления. Это объясняется тем, что в рассматриваемой постановке задача терминального управления, фактически, заключается в идентификации (наблюдении) требуемого вектора угловой скорости.

Условия полной наблюдаемости здесь являются необходимыми и достаточными для существования решения терминального управления. Для поиска собственно решения, в принципе, можно применять

любой из методов модального управления [4–9]. Поступим так же, как это сделано в работе [6], воспользовавшись методом, приведенным в работе [9].

Составим идентификационную модель вида (6). В этом случае матрица \mathbf{A}_p^D , входящая в уравнение невязок (10), будет равна

$$\mathbf{A}_p^D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & b_{31} & b_{32} & b_{33} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & b_{41} & b_{42} & b_{43} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{C}_p^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} b_{11} &= (\omega_x a_{11} p_1 - \lambda_{01} p_2 - \omega_x a_{11} p_3 - \lambda_{00} \omega_x p_4); \\ b_{21} &= (-\omega_x a_{21} p_1 + \lambda_{00} p_2 + \omega_x a_{21} p_3 - \lambda_{01} \omega_x p_4); \\ b_{31} &= (-\omega_x a_{31} p_1 + \lambda_{03} p_2 + \omega_x a_{31} p_3 - \lambda_{02} \omega_x p_4); \\ b_{41} &= (-\omega_x a_{41} p_1 - \lambda_{02} p_2 + \omega_x a_{41} p_3 - \lambda_{03} \omega_x p_4); \\ b_{12} &= (\omega_y a_{12} p_1 - \lambda_{02} p_2 - \omega_y a_{12} p_3 - \lambda_{00} \omega_y p_4); \\ b_{22} &= (-\omega_y a_{22} p_1 - \lambda_{03} p_2 + \omega_y a_{22} p_3 - \lambda_{01} \omega_y p_4); \\ b_{32} &= (-\omega_y a_{32} p_1 + \lambda_{00} p_2 + \omega_y a_{32} p_3 - \lambda_{02} \omega_y p_4); \\ b_{42} &= (-\omega_y a_{42} p_1 + \lambda_{01} p_2 + \omega_y a_{42} p_3 - \lambda_{03} \omega_y p_4); \\ b_{13} &= (\omega_z a_{31} p_1 - \lambda_{03} p_2 - \omega_z a_{31} p_3 - \lambda_{00} \omega_z p_4); \\ b_{23} &= (-\omega_z a_{23} p_1 + \lambda_{02} p_2 + \omega_z a_{23} p_3 - \lambda_{01} \omega_z p_4); \\ b_{33} &= (-\omega_z a_{33} p_1 - \lambda_{01} p_2 + \omega_z a_{33} p_3 - \lambda_{02} \omega_z p_4); \\ b_{43} &= (-\omega_z a_{43} p_1 + \lambda_{00} p_2 + \omega_z a_{43} p_3 - \lambda_{03} \omega_z p_4), \end{aligned}$$

$$p_1 = \frac{\sin\left(\frac{\omega t}{2}\right)}{\omega^3}, p_2 = \frac{\sin\left(\frac{\omega t}{2}\right)}{\omega},$$

$$p_3 = \frac{t \cos\left(\frac{\omega t}{2}\right)}{2\omega^2}, p_4 = \frac{t \sin\left(\frac{\omega t}{2}\right)}{2\omega}.$$

Применим изложенный в работе [10] подход к решению задачи идентификации вектора угловой скорости. Для этого сначала определим число уровней декомпозиции. В рассматриваемом случае размерность подпространства состояний, описывающих вспомогательную систему (10), равна $n = 7$, размерность векторов управления $m = 4$, при этом число уровней декомпозиции определяется функцией

$$J = \text{ceil}\left(\frac{N}{r}\right) - 1 = \text{ceil}\frac{7}{4} - 1 = 2 - 1 = 1.$$

Здесь $\text{ceil}(\ast)$ — операция округления числа (\ast) в сторону большего значения.

Отсюда получаем два уровня декомпозиции: нулевой и первый.

В соответствии с соотношением (15) и на основании выражения (4) имеем

$$\bar{\mathbf{A}} = (\mathbf{A}_p^D)^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline b_{11} & b_{21} & b_{31} & b_{41} & 1 & 0 & 0 \\ b_{12} & b_{22} & b_{32} & b_{42} & 0 & 1 & 0 \\ b_{13} & b_{23} & b_{33} & b_{43} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\bar{\mathbf{B}} = \mathbf{C}_p^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Согласно алгоритму нулевой уровень декомпозиции для рассматриваемой системы имеет вид $\mathbf{A}_0 = \bar{\mathbf{A}}$, $\mathbf{B}_0 = \bar{\mathbf{B}}$.

Для нахождения первого уровня декомпозиции вычислим матрицу-аннулятор и 2-полуобратную матрицу [9]. Имеем

$$\mathbf{B}_0^\perp = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_0^{\perp-} = \mathbf{B}_0^{\perp T}.$$

Далее получим матрицы первого уровня

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{21} & b_{31} & b_{41} \\ b_{12} & b_{22} & b_{32} & b_{42} \\ b_{13} & b_{23} & b_{33} & b_{43} \end{bmatrix}.$$

Анализ матрицы \mathbf{B}_1 показывает, что ее ранг по строкам превышает ранг по столбцам ($4 > 3$). Выполнение ее "скелетного" разложения дает

$$\widehat{\mathbf{B}}_1 = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & l_{13} \\ l_{21} & l_{22} & l_{23} \\ l_{31} & l_{32} & l_{33} \\ l_{41} & l_{42} & l_{43} \end{bmatrix},$$

$$\text{где } l_{11} = \frac{b_{22} b_{33} - b_{23} b_{32}}{c}; l_{12} = -\frac{b_{21} b_{33} - b_{23} b_{31}}{c};$$

$$l_{13} = \frac{b_{21} b_{32} - b_{22} b_{31}}{c}; l_{21} = -\frac{b_{12} b_{33} - b_{13} b_{32}}{c};$$

$$l_{22} = \frac{b_{11} b_{33} - b_{13} b_{31}}{c}; l_{23} = -\frac{b_{11} b_{32} - b_{12} b_{31}}{c};$$

$$l_{31} = \frac{b_{12}b_{23} - b_{13}b_{22}}{c}; l_{32} = -\frac{b_{11}b_{23} - b_{13}b_{21}}{c};$$

$$l_{33} = \frac{b_{11}b_{22} - b_{12}b_{21}}{c}; l_{41} = l_{42} = l_{43} = 0;$$

$$c = b_{11}b_{22}b_{33} - b_{11}b_{23}b_{32} - b_{12}b_{21}b_{33} + b_{12}b_{23}b_{31} + b_{13}b_{21}b_{32} - b_{13}b_{22}b_{31}.$$

Зададим далее матрицу собственных значений Φ_1 в следующем (диагональном) виде:

$$\Phi_1 = \text{diag}(f_{11} f_{12} f_{13}).$$

Тогда, выполняя вычисления для матрицы регулятора первого уровня [9], получим

$$\widehat{\mathbf{L}}_1 = \Phi_1 - \mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} f_{11} - 1 & 0 & 0 \\ 0 & f_{12} - 1 & 0 \\ 0 & 0 & f_{13} - 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{L}_1 = \widehat{\mathbf{B}}_1 \widehat{\mathbf{L}}_1 = \begin{bmatrix} l_{11}(f_{11} - 1) & l_{12}(f_{12} - 1) & l_{13}(f_{13} - 1) \\ l_{21}(f_{11} - 1) & l_{22}(f_{12} - 1) & l_{23}(f_{13} - 1) \\ l_{31}(f_{11} - 1) & l_{32}(f_{12} - 1) & l_{33}(f_{13} - 1) \\ l_{41}(f_{11} - 1) & l_{42}(f_{12} - 1) & l_{43}(f_{13} - 1) \end{bmatrix}.$$

Для нулевого уровня декомпозиции при задании Φ_0 в виде

$$\Phi_0 = \text{diag}(f_{01} f_{02} f_{03} f_{04})$$

будем иметь

$$\mathbf{B}_0^- = \mathbf{B}_0^+ - \mathbf{L}_0 \mathbf{B}_0^+ =$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0; & -l_{11}(f_{11} - 1) & -l_{12}(f_{12} - 1) & -l_{13}(f_{13} - 1) \\ 0 & 1 & 0 & 0; & -l_{21}(f_{11} - 1) & -l_{22}(f_{12} - 1) & -l_{23}(f_{13} - 1) \\ 0 & 0 & 1 & 0; & -l_{31}(f_{11} - 1) & -l_{32}(f_{12} - 1) & -l_{33}(f_{13} - 1) \\ 0 & 0 & 0 & 1; & -l_{41}(f_{11} - 1) & -l_{42}(f_{12} - 1) & -l_{43}(f_{13} - 1) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{L}_0 = \Phi_0 \mathbf{B}_0^- - \mathbf{B}_0^- \mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} & k_{17} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} & k_{27} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} & k_{37} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} & k_{46} & k_{47} \end{bmatrix},$$

где

$$k_{11} = f_{01} + b_{11}l_{11}(f_{11} - 1) + b_{12}l_{12}(f_{12} - 1) + b_{13}l_{13}(f_{13} - 1) - 1;$$

$$k_{12} = b_{21}l_{11}(f_{11} - 1) + b_{22}l_{12}(f_{12} - 1) + b_{23}l_{13}(f_{13} - 1);$$

$$k_{13} = b_{31}l_{11}(f_{11} - 1) + b_{32}l_{12}(f_{12} - 1) + b_{33}l_{13}(f_{13} - 1);$$

$$k_{14} = b_{41}l_{11}(f_{11} - 1) + b_{42}l_{12}(f_{12} - 1) + b_{43}l_{13}(f_{13} - 1);$$

$$k_{15} = -l_{11}(f_{01} - 1)(f_{11} - 1);$$

$$k_{16} = -l_{12}(f_{01} - 1)(f_{12} - 1);$$

$$k_{17} = -l_{13}(f_{01} - 1)(f_{13} - 1);$$

$$k_{21} = -b_{11}l_{21}(f_{11} - 1) + b_{12}l_{22}(f_{12} - 1) + b_{13}l_{23}(f_{13} - 1);$$

$$k_{22} = f_{02} + b_{21}l_{21}(f_{11} - 1) + b_{22}l_{22}(f_{12} - 1) + b_{23}l_{23}(f_{13} - 1) - 1;$$

$$k_{23} = b_{31}l_{21}(f_{11} - 1) + b_{32}l_{22}(f_{12} - 1) + b_{33}l_{23}(f_{13} - 1);$$

$$k_{24} = b_{41}l_{21}(f_{11} - 1) + b_{42}l_{22}(f_{12} - 1) + b_{43}l_{23}(f_{13} - 1);$$

$$k_{25} = -l_{21}(f_{02} - 1)(f_{11} - 1);$$

$$k_{26} = -l_{22}(f_{02} - 1)(f_{12} - 1);$$

$$k_{27} = -l_{23}(f_{02} - 1)(f_{13} - 1);$$

$$k_{31} = b_{11}l_{31}(f_{11} - 1) + b_{12}l_{32}(f_{12} - 1) + b_{13}l_{33}(f_{13} - 1);$$

$$k_{32} = b_{21}l_{31}(f_{11} - 1) + b_{22}l_{32}(f_{12} - 1) + b_{23}l_{33}(f_{13} - 1);$$

$$k_{33} = f_{03} + b_{31}l_{31}(f_{11} - 1) + b_{32}l_{32}(f_{12} - 1) + b_{33}l_{33}(f_{13} - 1) - 1;$$

$$k_{34} = b_{41}l_{31}(f_{11} - 1) + b_{42}l_{32}(f_{12} - 1) + b_{43}l_{33}(f_{13} - 1);$$

$$k_{35} = -l_{31}(f_{03} - 1)(f_{11} - 1);$$

$$k_{36} = -l_{32}(f_{03} - 1)(f_{12} - 1);$$

$$k_{37} = -l_{33}(f_{03} - 1)(f_{13} - 1);$$

$$k_{41} = b_{11}l_{41}(f_{11} - 1) + b_{12}l_{42}(f_{12} - 1) + b_{13}l_{43}(f_{13} - 1);$$

$$k_{42} = b_{21}l_{41}(f_{11} - 1) + b_{22}l_{42}(f_{12} - 1) + b_{23}l_{43}(f_{13} - 1);$$

$$k_{43} = b_{31}l_{41}(f_{11} - 1) + b_{32}l_{42}(f_{12} - 1) + b_{33}l_{43}(f_{13} - 1);$$

$$k_{44} = f_{04} + b_{41}l_{41}(f_{11} - 1) + b_{42}l_{42}(f_{12} - 1) + b_{43}l_{43}(f_{13} - 1);$$

$$k_{45} = -l_{41}(f_{04} - 1)(f_{11} - 1);$$

$$k_{46} = -l_{42}(f_{04} - 1)(f_{12} - 1);$$

$$k_{47} = -l_{43}(f_{04} - 1)(f_{13} - 1);$$

Тогда уравнение оценки компонент вектора ω запишутся следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \widehat{\omega}_x \\ \widehat{\omega}_y \\ \widehat{\omega}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \widehat{\omega}_{x0} \\ \widehat{\omega}_{y0} \\ \widehat{\omega}_{z0} \end{bmatrix} + \mathbf{L}_\omega^T \begin{bmatrix} \widetilde{x}_1 \\ \widetilde{x}_2 \\ \widetilde{x}_3 \\ \widetilde{x}_4 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Здесь

$$\mathbf{L}_\omega^T = \begin{bmatrix} k_{15} & k_{25} & k_{35} & k_{45} \\ k_{16} & k_{26} & k_{36} & k_{37} \\ k_{17} & k_{27} & k_{37} & k_{47} \end{bmatrix},$$

а индексом "0" обозначены значения предыдущего такта вычислений.

Синтез значений вектора управляющего момента

Динамические уравнения вращательного движения КА запишем следующим образом:

$$\begin{aligned} J_x \dot{\omega}_x + (J_z - J_y) \omega_y \omega_z &= M_x; \\ J_y \dot{\omega}_y + (J_x - J_z) \omega_x \omega_z &= M_y; \\ J_z \dot{\omega}_z + (J_y - J_x) \omega_x \omega_y &= M_z. \end{aligned} \quad (18)$$

Здесь J_x, J_y, J_z — моменты инерции КА относительно осей Ox, Oy, Oz ; M_x, M_y, M_z — управляющие моменты по осям ССК, действующие на КА.

Для синтеза значений вектора управляющего момента на первых двух участках ориентации перепишем уравнения динамики вращательного движения (18) в следующем виде:

$$\dot{\omega} = \mathbf{A}_{\omega}\omega + \mathbf{B}_{\omega}\mathbf{u}_{\omega}, \quad (19)$$

где $\dot{\omega} = [\dot{\omega}_x \ \dot{\omega}_y \ \dot{\omega}_z]^T$, $\omega = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$, $\mathbf{u}_{\omega} = [M_x \ M_y \ M_z]^T$,

$$\mathbf{A}_{\omega} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{J_y - J_z}{J_x} \omega_z & \frac{J_y - J_z}{J_x} \omega_y \\ \frac{J_z - J_x}{J_y} \omega_z & 0 & \frac{J_z - J_x}{J_y} \omega_x \\ \frac{J_x - J_y}{J_z} \omega_y & \frac{J_x - J_y}{J_z} \omega_x & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{\omega} = \begin{bmatrix} J_x^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & J_y^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & J_z^{-1} \end{bmatrix}.$$

Соотношение (19) представляет собой нелинейную нестационарную систему уравнений. Для синтеза значений компонент вектора управляющего момента предлагается на каждом отдельном такте БЦВМ использовать систему (19), линеаризованную в окрестности значения вектора состояния на начало каждого такта работы БЦВМ.

После проведения процедуры линеаризации система (19) запишется следующим образом:

$$\Delta \dot{\omega} = \mathbf{A}_{\omega 0} \Delta \omega + \mathbf{B}_{\omega 0} \Delta \mathbf{u}_{\omega}, \quad (20)$$

где $\Delta \dot{\omega} = [\Delta \dot{\omega}_x \ \Delta \dot{\omega}_y \ \Delta \dot{\omega}_z]^T$, $\Delta \omega = [\Delta \omega_x \ \Delta \omega_y \ \Delta \omega_z]^T$,

$\Delta \mathbf{u}_{\omega} = [\Delta M_x \ \Delta M_y \ \Delta M_z]^T$.

Для нахождения закона управления $\Delta \mathbf{u}_{\omega} = -\mathbf{K}_{\omega 0} \Delta \omega$ также можно воспользоваться алгоритмом многоуровневой декомпозиции, описанным в работе [7].

В этом случае имеет место трехмерное пространство состояний и трехмерный вектор управления, откуда следует, что максимальный уровень используемой декомпозиции — нулевой. Нулевой уровень декомпозиции для системы (20) имеет вид

$$\mathbf{A}_{\omega 0} = \bar{\mathbf{A}}_{\omega}, \quad \mathbf{B}_{\omega 0} = \bar{\mathbf{B}}.$$

Как и прежде, зададим матрицу Φ_0 в диагональном виде:

$$\Phi_{\omega 0} = \text{diag}(n_{01} \ n_{02} \ n_{03}).$$

Тогда матрица обратной связи будет иметь вид

$$\mathbf{K}_{\omega 0} = \Phi_{\omega 0} \mathbf{B}_{\omega 0}^{-1} - \mathbf{B}_{\omega 0}^{-1} \mathbf{A}_{\omega 0} = \begin{bmatrix} J_x n_{01} & -\omega_z (J_y - J_z) & -\omega_y (J_y - J_z) \\ \omega_z (J_x - J_z) & J_y n_{02} & \omega_x (J_x - J_z) \\ -\omega_y (J_x - J_y) & -\omega_x (J_x - J_y) & J_z n_{03} \end{bmatrix},$$

$$\text{где } \mathbf{B}_{\omega 0}^{-1} = \mathbf{B}_{\omega 0}^{+} = \begin{bmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{bmatrix}.$$

Для синтеза значений вектора управляющего момента на последнем участке построения ориентации необходимо определить момент начала торможения. Рассчитать момент переключения алгоритмов можно различными способами, в данном случае в качестве условия перехода будем использовать следующее соотношение:

$$\sqrt{\psi^2 + \vartheta^2 + \gamma^2} \leq \frac{t_{\text{tor}}}{2} \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2},$$

где t_{tor} — время, отводимое на торможение, принимается в размере 10 % от задаваемого времени на построение ориентации, но не менее 10 с (алгоритм прогнозирования также будет использовать уменьшенный интервал времени для выполнения прогноза); ψ , ϑ , γ — углы Крылова, описывающие рассогласование между текущим и конечным положениями, связаны с кватернионами следующими соотношениями [1]:

$$\sin \psi = 2(\lambda_0 \lambda_2 - \lambda_1 \lambda_3);$$

$$\text{tg} \vartheta = \frac{2(\lambda_1 \lambda_2 - \lambda_0 \lambda_3)}{2(\lambda_0^2 + \lambda_1^2) - 1};$$

$$\text{tg} \gamma = \frac{2(\lambda_2 \lambda_3 + \lambda_0 \lambda_1)}{2(\lambda_0^2 + \lambda_3^2) - 1}$$

или приближенно:

$$\psi \approx 2\lambda_0 \lambda_2, \quad \vartheta \approx 2\lambda_0 \lambda_3, \quad \gamma \approx 2\lambda_0 \lambda_1.$$

Линеаризованная математическая модель вращательного движения КА в отклонениях выглядит следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_{24} & 0 & g_{26} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & g_{42} & 0 & 0 & 0 & g_{46} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & g_{62} & 0 & g_{64} & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ J_x^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_y^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_z^{-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix}, \quad (21)$$

где $g_{24} = \frac{J_y - J_z}{J_x} \omega_z$, $g_{26} = \frac{J_y - J_z}{J_x} \omega_y$, $g_{42} = \frac{J_z - J_x}{J_y} \omega_z$,

$g_{46} = \frac{J_z - J_x}{J_y} \omega_x$, $g_{62} = \frac{J_x - J_y}{J_z} \omega_y$, $g_{64} = \frac{J_x - J_y}{J_z} \omega_x$,

J_x, J_y, J_z — главные центральные моменты инерции КА;

$x_1 = \gamma, x_2 = \omega_x, x_3 = \psi, x_4 = \omega_y, x_5 = \vartheta, x_6 = \omega_z$;
 γ, ϑ, ψ — углы крена, рыскания и тангажа; M_x, M_y, M_z — управляющие моменты.

Рассмотрим синтез значений компонент вектора управляющего момента на участке торможения. Для системы (21) размерность пространства состояний $n = 6$, размерность вектора управления $m = 3$. В результате применяемая декомпозиция содержит два уровня (нулевой и первый).

Для нахождения первого уровня декомпозиции вычислим матрицу-аннулятор и 2-полуобратную матрицу. Имеем

$$\mathbf{B}_{\tau 0}^{\perp} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{\tau 0}^{\perp-} = \mathbf{B}_{\tau 0}^{\perp T};$$

$$\mathbf{B}_{\tau 0}^{+} = \begin{bmatrix} 0 & J_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_z \end{bmatrix}.$$

Далее вычислим матрицы первого уровня

$$\mathbf{A}_{\tau 1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{\tau 1} = \begin{bmatrix} J_x^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & J_y^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & J_z^{-1} \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{\tau 1}^{+} = \begin{bmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{bmatrix}.$$

Зададим матрицы $\Phi_{\tau 0}, \Phi_{\tau 1}$ в следующем (диагональном) виде:

$$\Phi_{\tau 1} = \text{diag}(c_{11} \ c_{12} \ c_{13}), \Phi_{\tau 0} = \text{diag}(c_{01} \ c_{02} \ c_{03}),$$

где c_{ij} — некоторые вещественные числа.

Тогда

$$\mathbf{L}_{\tau 1} = \begin{bmatrix} -J_x c_{11} & 0 & 0 \\ 0 & -J_y c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & -J_z c_{13} \end{bmatrix}.$$

Для нулевого уровня декомпозиции

$$\mathbf{B}_{\tau 0}^{-} = \begin{bmatrix} -J_x c_{11} & J_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -J_y c_{12} & J_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -J_z c_{13} & J_z \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{K}_{\tau 0} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & 0 & q_{14} & 0 & q_{16} \\ 0 & q_{22} & q_{23} & q_{24} & 0 & q_{26} \\ 0 & q_{32} & 0 & q_{34} & q_{35} & q_{36} \end{bmatrix},$$

где

$$q_{11} = J_x c_{01} c_{11}; \quad q_{12} = -J_x(c_{01} + c_{11}); \quad q_{14} = J_x g_{24}; \\ q_{16} = J_x g_{26}; \quad q_{22} = J_y g_{42}; \quad q_{23} = J_y c_{02} c_{12}; \\ q_{24} = -J_y(c_{02} + c_{12}); \quad q_{26} = J_y g_{46}; \quad q_{32} = J_z g_{62}; \\ q_{34} = J_z g_{64}; \quad q_{35} = J_z c_{03} c_{13}; \quad q_{36} = -J_z(c_{03} + c_{13});$$

$$g_{24} = \frac{J_y - J_z}{J_x} \omega_z; \quad g_{26} = \frac{J_y - J_z}{J_x} \omega_y; \quad g_{42} = \frac{J_z - J_x}{J_y} \omega_z; \\ g_{46} = \frac{J_z - J_x}{J_y} \omega_x; \quad g_{62} = \frac{J_x - J_y}{J_z} \omega_y; \quad g_{64} = \frac{J_x - J_y}{J_z} \omega_x.$$

Моделирование режима построения ориентации КА

Рассмотрим в детерминированной постановке пример серии испытаний терминального построения ориентации КА в инерциальной системе координат с варьированием значений начальной ориентации КА с шагом 0,4 рад по углам ϑ, γ и 0,2 рад по углу ψ :

$$\begin{bmatrix} \gamma \\ \psi \\ \vartheta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3,0..3,0 \\ -1,5..1,5 \\ -3,0..3,0 \end{bmatrix} \text{ рад.}$$

Время построения ориентации было задано 60 с. Выделим на торможение $t_{\text{тор}} = 10$ с, так как 10 % от времени поворота меньше этого значения.

Считаем, что матрица моментов инерции КА равна

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 7800,77 & 0 & 0 \\ 0 & 6200,348 & 0 \\ 0 & 0 & 5900,55 \end{bmatrix} \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}.$$

Предположим, что реализация управляющего момента осуществляется с использованием двигателей с дросселируемой тягой или с использованием инерционных исполнительных органов. При этом серьезных ограничений на максимальный управляющий момент не накладывается.

Значения всех полюсов $f_{01}, f_{02}, f_{03}, f_{11}, f_{12}, f_{13}$ алгоритма оценки угловой скорости $\hat{\omega}$ примем равными 0,4.

Значения полюсов в алгоритме синтеза управляющего момента на участке разгона и движения с постоянной скоростью примем равными

$$n_{01} = n_{02} = n_{03} = -0,5.$$

Значения полюсов на участке торможения примем следующими:

$$c_{01} = c_{02} = c_{03} = c_{11} = c_{12} = c_{13} = -0,4.$$

Полученные результаты моделирования, которые определяли значения компонент вектора угловой скорости КА и значения углов в момент заданного завершения процесса терминального построения ориентации, представлены на рис. 1–6.

Математические ожидания и среднеквадратические отклонения имеют следующие значения:

$$M[\omega_x] = -4,6202 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}; \quad M[\omega_y] = 2,2365 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}; \\ M[\omega_z] = -1,1582 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}; \\ \sigma_{\omega_x} = 1,138 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}; \quad \sigma_{\omega_y} = 5,4221 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}; \\ \sigma_{\omega_z} = 1,1185 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1};$$

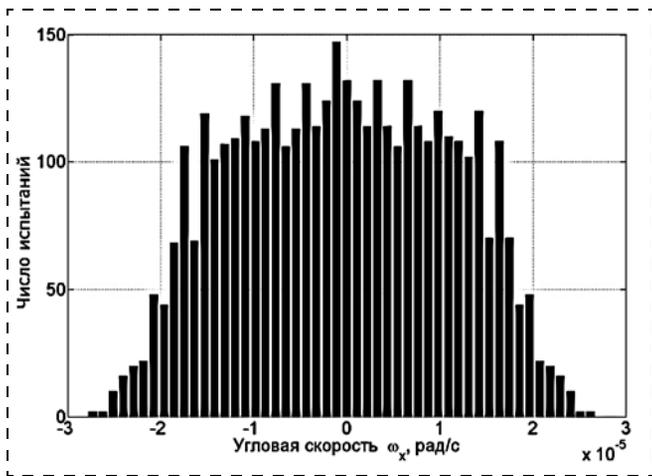


Рис. 1. Распределение значений угловой скорости по оси OX на момент окончания процесса построения ориентации (случай изменения углов)

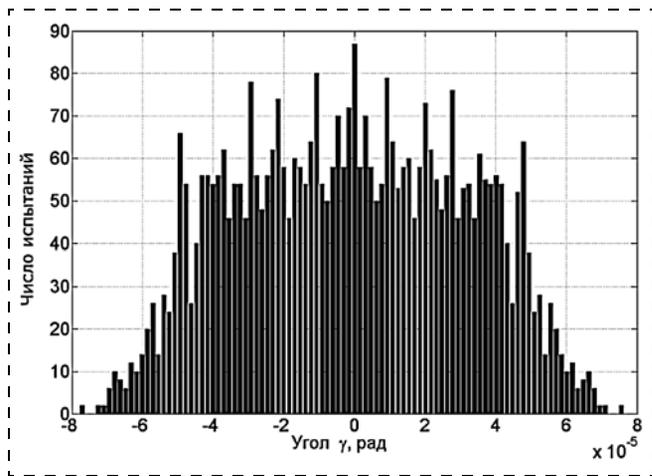


Рис. 4. Распределение значений углов крена на момент окончания процесса построения ориентации (случай изменения углов)

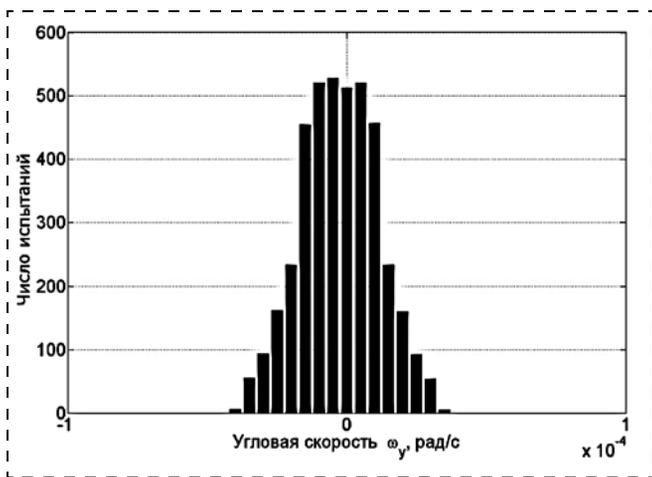


Рис. 2. Распределение значений угловой скорости по оси OY на момент окончания процесса построения ориентации (случай изменения углов)

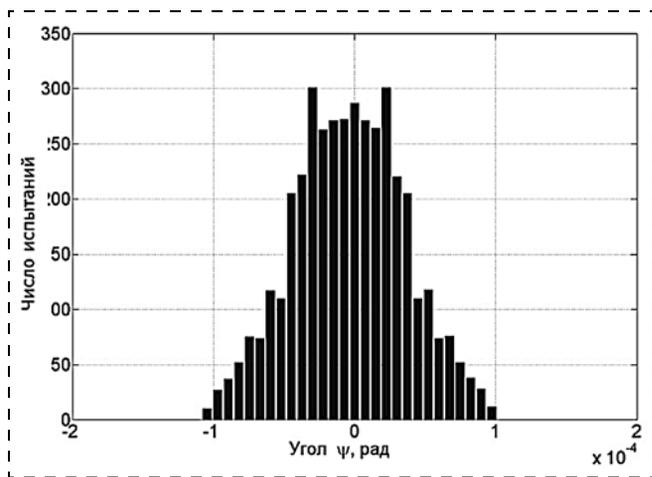


Рис. 5. Распределение значений углов рыскания на момент окончания процесса построения ориентации (случай изменения углов)

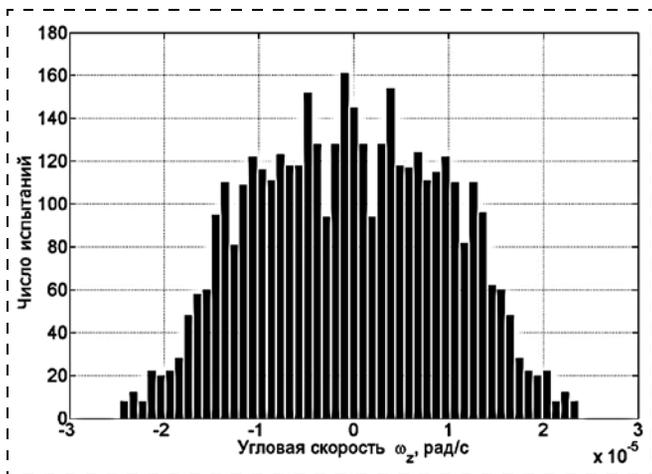


Рис. 3. Распределение значений угловой скорости по оси OZ на момент окончания процесса построения ориентации (случай изменения углов)

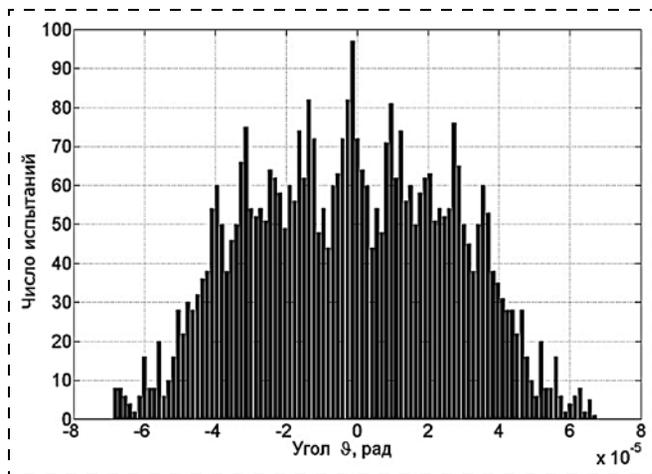


Рис. 6. Распределение значений углов тангажа на момент окончания процесса построения ориентации (случай изменения углов)

$$M[\gamma] = 1,1728 \cdot 10^{-5} \text{ рад}; M[\psi] = -6,9224 \cdot 10^{-7} \text{ рад};$$

$$M[\vartheta] = 3,2286 \cdot 10^{-6} \text{ рад};$$

$$\sigma_\gamma = 1,0322 \cdot 10^{-4} \text{ рад}; \sigma_\psi = 1,5707 \cdot 10^{-6} \text{ рад};$$

$$\sigma_\vartheta = 3,1303 \cdot 10^{-6} \text{ рад}.$$

Также было проведено моделирование серии испытаний с изменением требуемого времени построения ориентации при неизменных параметрах начального положения:

$$\begin{bmatrix} \gamma \\ \psi \\ \vartheta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,13 \\ -0,1 \\ 0,1 \end{bmatrix} \text{ рад или } \Lambda_0 = \begin{bmatrix} 0,0083 \\ 0,9975 \\ 0,0502 \\ 0,0496 \end{bmatrix}, \Lambda_{pr} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Время изменялось от 50 до 150 с с шагом 0,01 с.

При этом остальные условия построения ориентации были оставлены прежними. Полученные результаты моделирования, которые определяли

значения компонент вектора угловой скорости КА и значения углов в момент заданного завершения процесса терминального построения ориентацией, представлены на рис. 7–12.

Математические ожидания и среднеквадратичские отклонения в этом случае имеют следующие значения:

$$M[\omega_x] = 4,4475 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}; M[\omega_y] = -3,9974 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1};$$

$$M[\omega_z] = 2,4375 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1};$$

$$\sigma_{\omega_x} = 1,138 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}; \sigma_{\omega_y} = 2,3910 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1};$$

$$\sigma_{\omega_z} = 9,9975 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1};$$

$$M[\gamma] = -1,2455 \cdot 10^{-7} \text{ рад}; M[\psi] = 1,1443 \cdot 10^{-7} \text{ рад};$$

$$M[\vartheta] = -6,6185 \cdot 10^{-8} \text{ рад};$$

$$\sigma_\gamma = 3,2028 \cdot 10^{-5} \text{ рад}; \sigma_\psi = 7,0416 \cdot 10^{-5} \text{ рад};$$

$$\sigma_\vartheta = 2,8195 \cdot 10^{-6} \text{ рад}.$$

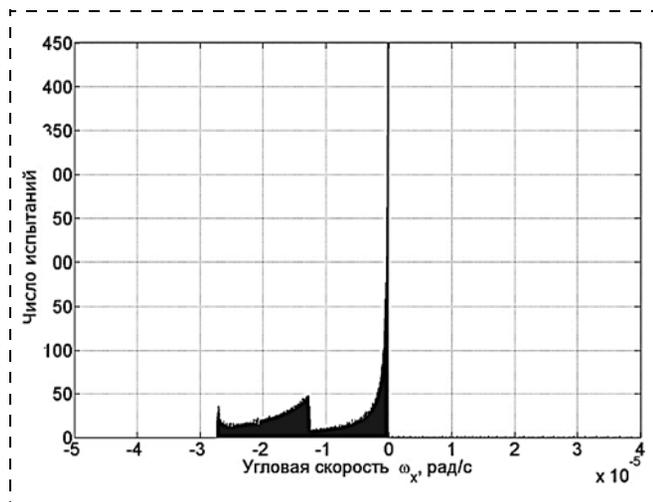


Рис. 7. Распределение значений угловой скорости по оси OX на момент окончания процесса построения ориентации (случай изменения времени)

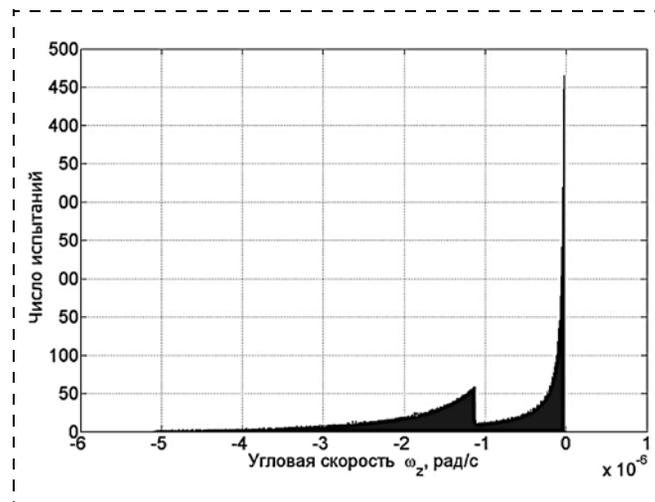


Рис. 9. Распределение значений угловой скорости по оси OZ на момент окончания процесса построения ориентации (случай изменения времени)

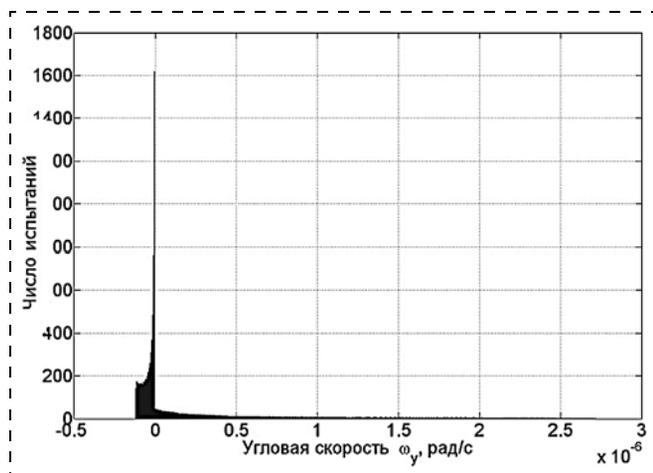


Рис. 8. Распределение значений угловой скорости по оси OY на момент окончания процесса построения ориентации (случай изменения времени)

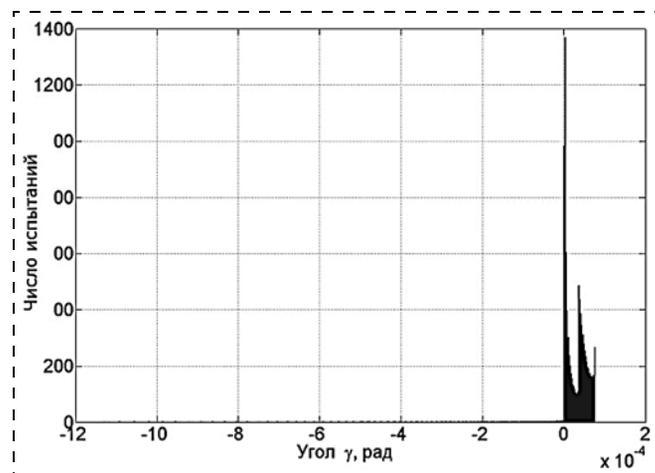


Рис. 10. Распределение значений углов крена на момент окончания процесса построения ориентации (случай изменения углов)

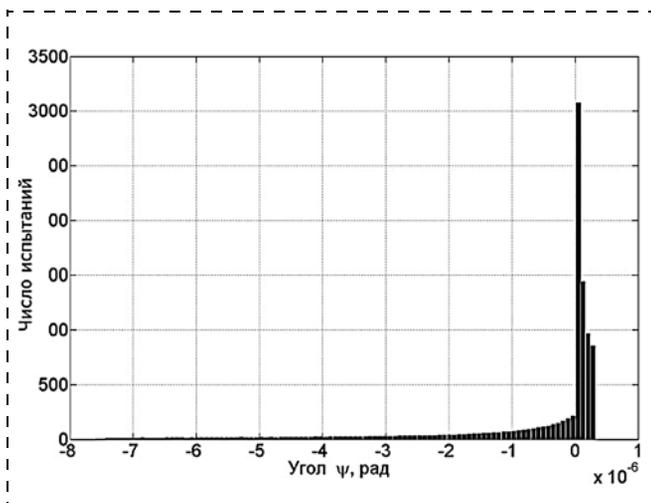


Рис. 11. Распределение значений углов рыскания на момент окончания процесса построения ориентации (случай изменения времени)

Как показали результаты моделирования, с использованием предложенных алгоритмов построение терминальной ориентации КА в инерциальной системе координат успешно завершается за заданный временной интервал, при этом обеспечивается высокая точность управления.

Заключение

В работе предложен алгоритм синтеза терминального управления построением инерциальной ориентации космического аппарата. Алгоритм основан на аналитическом решении задачи определения программных значений компонент вектора угловой скорости при пространственном развороте космического аппарата в инерциальной системе координат. Данное аналитическое решение получено с применением ранее предложенного авторами метода решения краевой задачи, основанного на идентификации параметров дискретной модели с использованием модального управления и стабилизации как программных значений компонент вектора управления, так и требуемого углового положения космического аппарата. Приведены результаты моделирования, демонстрирующие работоспособность предложенного подхода и высокую точность управления на момент окончания режима построения инерциальной ориентации.

Список литературы

1. Голубев Ю. Ф. Алгебра кватернионов в кинематике твердого тела // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2013. № 39. 23 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprmt.asp?iv=2013-39>

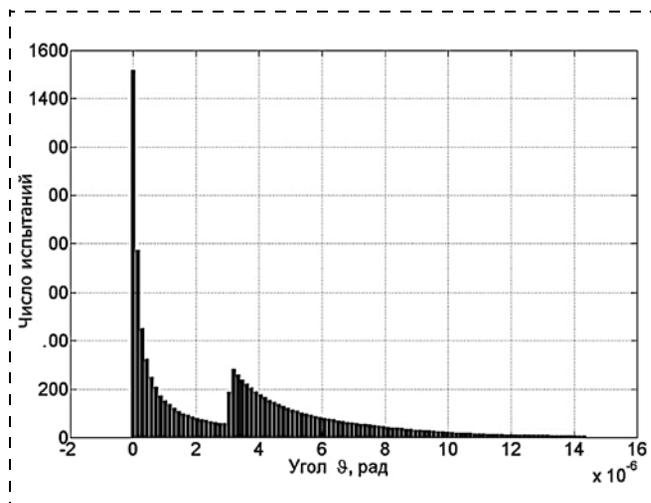


Рис. 12. Распределение значений углов тангажа на момент окончания процесса построения ориентации (случай изменения времени)

2. Зубов Н. Е. Оптимальное управление терминальной переориентации КА на основе алгоритма с прогнозирующей моделью // Космические исследования. 1991. Т. 29. № 3. С. 340—350.

3. **Справочник** по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 712 с.

4. Воробьева Е. А., Зубов Н. Е., Микрин Е. А. и др. Синтез стабилизирующего управления космическим аппаратом на основе обобщенной формулы Аккермана // Изв. РАН. ТиСУ. 2011. № 1. С. 96—106.

5. Зубов Н. Е., Микрин Е. А., Мисриханов М. Ш. и др. Идентификация положения равновесной ориентации международной космической станции как задача матричного пополнения с устойчивостью // Изв. РАН. ТиСУ. 2012. № 2. С. 130—144.

6. Зубов Н. Е., Микрин Е. А., Рябченко В. Н., Олейник А. С., Ефанов Д. Е. Оценка угловой скорости космического аппарата в режиме орбитальной стабилизации по результатам измерений датчика местной вертикали // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". 2014. № 5. С. 3—17.

7. Зубов Н. Е., Микрин Е. А., Мисриханов М. Ш., Рябченко В. Н. Синтез законов управления космическим аппаратом, обеспечивающих оптимальное размещение полюсов замкнутой системой управления // Изв. РАН. ТиСУ. 2012. № 3. С. 98—111.

8. Зубов Н. Е., Микрин Е. А., Мисриханов М. Ш. и др. Применение алгоритма точного размещения полюсов при решении задач наблюдения и идентификации в процессе управления движением космического аппарата // Изв. РАН. ТиСУ. 2013. № 1. С. 135—151.

9. Зубов Н. Е., Микрин Е. А., Мисриханов М. Ш. и др. Модификация метода точного размещения полюсов и его применение в задачах управления движением космического аппарата // Изв. РАН. ТиСУ. 2013 г. № 2. С. 118—132.

10. Зубов Н. Е., Микрин Е. А., Мисриханов М. Ш., Олейник А. С., Рябченко В. Н. Терминальное релейно-импульсное управление линейными стационарными динамическими системами // Изв. РАН. ТиСУ. 2014. № 3. С. 134—149.

Terminal Inertial Attitude Control for a Spacecraft

N. E. Zubov^{1,2}, nikolay.zubov@rsce.ru✉, **M. V. Li**², marat.li@rsce.ru,
E. K. Li¹, elen.k.lee@student.bmstu.ru, **E. A. Mikrin**^{1,2}, eugeny.mikrin@rsce.ru, **V. N. Ryabchenko**^{1,2},
¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation,
² Energia Rocket and Space Corporation, Moscow Region, Korolev, 141070, Russian Federation

Corresponding author: **Zubov Nikolay E.**, D. Sc., Professor, Deputy and Scientific Director of the Research and Development Centre of Energia Corporation named after S. P. Korolev, Professor of the Automatic Control System Department of Moscow State Technical University named after N. E. Bauman, e-mail: nikolay.zubov@rsce.ru

Received on August 03, 2015

Accepted on August 17, 2015

This paper addresses a terminal control scheme for a basic attitude maneuver of a spacecraft, formation of an "inertial attitude" mode in the finite time bounds. The algorithm is based on determination of the angular velocity program values. This determination uses the analytical expressions obtained by means of the boundary solution proposed in the authors' previous works. The solution assumes discrete model parameters' identification by the modal control decomposition method in the observer synthesis. The further stabilization of the attitude and angular velocity parameters is necessary. The angular motion control process is described by the kinematic equations in Rodrigues-Hamilton parameters and Euler's dynamic equations. Analytical solution of the kinematic equations with the constant values of the angular velocity is used to determine the program values of the angular velocity. This allows us to obtain new values of the program angular velocity in every onboard computer cycle. These values ensure forming up of the inertial attitude for the given time. The next step is to calculate an appropriate momentum control values. Linearized Euler's equations are used to get the control values. Linearization is performed at every cycle of the onboard computer. It gives a high degree approximation to the nonlinear model of a spacecraft angular motion. All the synthesized control laws and observer feedback coefficient matrices have simple analytic forms and can be implemented on the onboard digital computer for a real-time execution to form-up the inertial attitude mode. Numerical examples are presented to demonstrate the successful work of the developed control algorithms for a wide variety of the initial conditions (initial attitude, maneuver time) in the inertial coordinate system.

Keywords: inertial attitude, mathematical model of spacecraft, finite-time control, synthesis of the angular velocity program values

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 14-11-00046.

For citation:

Zubov N. E., Li M. V., Li E. K., Mikrin E. A., Ryabchenko V. N. Terminal Inertial Attitude Control for a Spacecraft, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 57–66.

DOI: 10.17587/mau/17.57-66

References

1. **Golubev Ju. F.** Algebra kvaternionov v kinematike tverdogo tela (Quaternion algebra in rigid body kinematics), *Preprinty IPM im. M. V. Keldysha*, 2013, no. 39 (in Russian), available at: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-39> (date of accessed 20.07.2015).
2. **Zubov N. E.** Optimal'noe upravlenie terminal'noi pereorientatsii KA na osnove algoritma s prognoziruyushchei model'yu (Optimal control of spacecraft terminal orientation on the basis of an algorithm with a predicting model), *Kosmicheskie Issledovaniya*, 1991, vol. 29, no. 3, pp. 340–350 (in Russian).
3. **Aleksandrov A. G., Artem'ev V. M., Afanas'ev V. I., Ashimov A. A., Beloglazov I. I., Bukov V. N., Zemljakov S. N., Kazakevich V. V., Krasovskij A. A., Medvedev G. A., Rastrigip L. A., Rutkovskij V. Ju., Jusupov R. M., Jadykin I. B., Jakubovich. V. A.** *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya* (Automatic control theory reference book), Moscow, Science, 1987, 712 p. (in Russian).
4. **Zubov N. E., Vorob'eva E. A., Mikrin E. A., Misrikhanov M. Sh., Ryabchenko V. N., and Timakov S. N.** Sintez stabiliziruyushchego upravleniya kosmicheskim apparatom na osnove obobshchennoi formuly Akkermana (Synthesis of Stabilizing Spacecraft Control Based on Generalized Ackermann's Formula), *J. of Computer and Systems Sciences International*, 2011, vol. 50, pp. 93–103 (in Russian).
5. **Zubov N. E., Mikrin E. A., Misrikhanov M. Sh., Ryabchenko V. N., Timakov S. N., and Cheremnykh E. A.** Identifikatsiya polozheniya ravnovesnoi orientatsii mezhdunarodnoi kosmicheskoi stantsii kak zadacha matrichnogo popolneniya s ustoychivost'yu (Identification of the Position of an Equilibrium Attitude of the International Space Station as a Problem of Stable Matrix Completion), *J. Computer and Systems Sciences International*, 2012, vol. 51, pp. 291–305 (in Russian).
6. **Zubov N. E., Mikrin E. A., Ryabchenko V. N., Olejnik A. S., Efanov D. E.** Otsenka uglovoi skorosti kosmicheskogo apparata v rezhime orbital'noi stabilizatsii po rezul'tatam izmerenii datchika mestnoi vertikali (The Spacecraft Angular Velocity Estimation in the Orbital Stabilization Mode by The Results of the Local Vertical Sensor Measurements), *Vestnik MGTU im. N. Je. Baumana. Seriya "Priborostroenie"*, 2014, no. 5, pp. 3–17. (in Russian)
7. **Zubov N. E., Mikrin E. A., Misrikhanov M. Sh., Ryabchenko V. N.** Sintez zakonov upravleniya kosmicheskim apparatom, obespechivayushchikh optimaVnoe razmeshchenie polyusov zamknutoi sistemoi upravleniya (Synthesis of Controls for a Spacecraft That Optimize the Pole Placement of the Closed Loop Control System), *J. Computer and Systems Sciences International*, 2012, vol. 51, pp. 431–444 (in Russian).
8. **Zubov N. E., Mikrin E. A., Ryabchenko V. N.** et al. *Primeneniya algoritma tochnogo razmeshcheniya polyusov pri reshenii zadach nablyudeniya i identifikatsii v protsesse upravleniya dvizheniem kosmicheskogo apparata* (The Use of an Adaptive Bandpass Filter as an Observer in the Control Loop of the International Space Station), *J. Computer and Systems Sciences International*. 2012, vol. 51, pp. 560–572 (in Russian).
9. **Zubov N. E., Mikrin E. A., Misrikhanov M. Sh., Ryabchenko V. N.** Modifikatsiya metoda tochnogo razmeshcheniya polyusov i ego primeneniya v zadachakh upravleniya dvizheniem kosmicheskogo apparata (Modification the Exact Pole Placement Method and Its Application for the Control of Spacecraft Motion), *J. of Computer and Systems Sciences International*, 2013, vol. 52, pp. 279–292 (in Russian).
10. **Zubov N. E., Mikrin E. A., Misrikhanov M. Sh., Oleinik A. S., Ryabchenko V. N.** TerminaVnoe releino-impul'snoe upravlenie lineinymi statsionarnymi dinamicheskimi sistemami (Terminal bang-bang impulsive control of linear time invariant dynamic systems), *J. of Computer and Systems Sciences International*, 2014, vol. 53, pp. 480–490 (in Russian).

Ю. Б. Кулифеев, д-р техн. наук, проф., гл. специалист, 7108113@mail.ru,
Московский научно-производственный комплекс "Авионика" им. О. В. Успенского,
М. М. Миронова, аспирант, 7108113@mail.ru,
Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)

Оптимизация траектории снижения тяжелого беспилотного летательного аппарата на этапе полной посадки

Изложена методика оптимизации траектории снижения тяжелого беспилотного летательного аппарата самолетного типа, обеспечивающей мягкую посадку на наземный аэродром. Приведены результаты математического моделирования режима полной посадки тяжелого беспилотного летательного аппарата при отслеживании желаемой траектории снижения, в основу алгоритмов канала автоматического управления продольным движением положен метод обратных задач динамики.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, пилотажно-навигационная система беспилотного летательного аппарата, модель продольного движения беспилотного летательного аппарата, прямой участок снижения, кривая выравнивания, посадка беспилотного летательного аппарата самолетного типа

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БЛА) самолетной и вертолетной схем разрабатываются и производятся в более чем 30 странах мира. Отечественная беспилотная авиационная техника зародилась в 60...70 гг. XX века [1]. В настоящее время она переживает кризис развития, что связано с высоким уровнем аварийности БЛА. Причинами аварийности являются неудовлетворительные характеристики управляемости и устойчивости БЛА, недостатки в их системах управления, линиях передачи информации, недостаточной прочности конструкции БЛА. Особенно высок уровень аварийности на этапах полной посадки [2].

Как правило, на этапе посадки на наземный аэродром снижение БЛА осуществляется по траектории прямой глиссады с углом наклона 2...3° вплоть до касания колесами шасси взлетно-посадочной полосы (ВПП). При таком снижении в отсутствие траектории выравнивания происходит весьма жесткая посадка БЛА, что особенно нежелательно для тяжелых БЛА [3—5].

Целью работы являлась оптимизация траектории снижения тяжелого БЛА на этапе полной посадки в целях обеспечения мягкой посадки.

Для отработки желаемой траектории снижения БЛА при посадке на наземный аэродром вплоть до полной остановки использовался метод математического моделирования. В качестве объекта исследования выбран БЛА самолетного типа тяжелого класса. Математическая модель объекта включала аэродинамическую и динамическую модели пространственного движения БЛА как твердого тела, модель тяги двухдвигательной силовой установки, модель трехколесного упругого шасси с поворотной носовой стойкой и модели ветровых возмущений.

Для управления движением БЛА использовались алгоритмы автоматического управления, синтезированные по методу обратных задач динамики [6—8].

Общие требования к выполнению режима полной посадки

Посадка БЛА самолетного типа является сложным и потенциально опасным завершающим этапом полета. Успех выполнения посадки зависит от таких факторов, как летные характеристики БЛА, вид траектории снижения при посадке, возможности бортового оборудования, используемого для обеспечения посадки, характеристики аэродрома, возможности аэродромных систем посадки, а также метеоусловия в районе посадки [9—13].

Система автоматической посадки вплоть до остановки БЛА на ВПП должна обеспечить безопасность и успешность завершающего этапа полета БЛА, особенно в сложных метеоусловиях, характеризующихся низкой облачностью, осадками в виде дождя и снега, туманом, а также наличием ветровых возмущений.

При определении требований к режиму автоматической посадки на наземный аэродром тяжелого БЛА самолетного типа можно первоначально исходить из существующих требований к посадке пилотируемых самолетов с аналогичной посадочной массой [5, 14]. Так, для БЛА с посадочной массой порядка 10 т можно определить следующие требования к режиму полной посадки на аэродром, оборудованный радиотехническими системами посадки.

- Непосредственно перед выходом на глиссаду осуществляется выпуск шасси и закрылков.
- При входе в створ ВПП и выходе на глиссаду высота полета над аэродромом должна быть в диапазоне 250...300 м при удалении от ВПП на 5...6 км.
- На прямом участке глиссады снижение необходимо осуществлять с вертикальной скоростью 3...5 м/с. На высоте 200 м при проходе дальнего приводного радиомаяка (ДПРМ) скорость полета должна быть в диапазоне 320...330 км/ч. Ближний приводной радиомаяк (БПРМ) проходится на высоте 50...60 м при скорости 300...310 км/ч.

- Прямой участок глissады заканчивается на поверхности ВПП на расстоянии 50...60 м от ее начала. Поэтому с высоты 10...15 м следует начать выравнивание так, чтобы прекратить снижение и вывести БЛА в горизонтальный полет, когда расстояние от поверхности ВПП до колес основных стоек шасси составит 0,5...0,8 м. При этом двигатели переводятся в режим малого газа, а за счет отклонения стабилизатора обеспечивается посадочный угол атаки в диапазоне 10... 12° при скорости полета 250...260 км/ч.

Выпуск тормозного парашюта выполняется после начала устойчивого пробега на основных колесах. Начать тормозить следует при скорости не более 210...230 км/ч. Длина пробега при этом будет лежать в пределах 600...700 м. При посадке без выпуска тормозного парашюта длина пробега составляет около 1300 м.

Снижение БЛА после выхода в створ ВПП происходит по прямой глissаде. Прямой участок глissады может быть реализован как физическим способом с использованием радиотехнических средств, так и виртуальным способом. В последнем случае в память бортовой ЭВМ должны быть записаны пространственные координаты глissады с привязкой их к конкретному аэродрому посадки. Положение БЛА относительно виртуальной глissады будет известно, если известны координаты его пространственного движения, определяемые, например, с помощью спутниковой навигационной системы.

Снижение по прямому участку глissады должно заканчиваться переходом в снижение на участке выравнивания. Траектория движения БЛА при выравнивании должна задаваться в виде пространственной виртуальной кривой.

Таким образом, требуемая траектория посадки, задаваемая как виртуальная глissада, будет состоять из прямого участка снижения с углом наклона $\theta_{\text{гл}}$ и кривой выравнивания.

Построение траектории полета в процессе выравнивания

Участок глissады прямолинейного снижения определяется высотой входа в глissаду $H_{\text{гл.вх.прям}}$ и углом наклона прямого участка глissады $\theta_{\text{гл}}$.

Переход с прямого участка глissады на траекторию выравнивания происходит на заданной высоте начала выравнивания.

В широко известной книге [15], посвященной взлету и посадке самолетов, предлагается кривую выравнивания при автоматической посадке задавать экспонентой вида

$$H_{\text{гл.выр}} = H_{\text{н.выр}} \exp\left(-\frac{\text{tg}\theta_{\text{гл}}}{H_{\text{н.выр}}} s\right), \quad (1)$$

где $H_{\text{н.выр}}$ — заданная высота начала выравнивания; s — пройденный путь вдоль оси ВПП в процессе

выравнивания, т. е. при условии $H_{\text{гл.выр}} = H_{\text{н.выр}}$ полагается $s = 0$.

Таким образом, экспоненциальная кривая выравнивания задается только точкой в начале процесса выравнивания и определяется двумя параметрами: углом наклона глissады $\theta_{\text{гл}}$ и высотой начала выравнивания $H_{\text{н.выр}}$.

При условии $\theta_{\text{гл}} = \text{const}$ единственным варьируемым параметром является высота $H_{\text{н.выр}}$. Таким образом, для конкретного аэродрома воздушный путь при снижении БЛА до высоты касания колесами основных стоек шасси и вертикальная скорость в момент касания оказываются взаимно связанными и зависящими от высоты $H_{\text{н.выр}}$. Поэтому при малых значениях вертикальной скорости БЛА в момент касания точка касания колесами поверхности ВПП будет значительно удалена от начала ВПП, а при приземлении ближе к началу ВПП будет большая по модулю вертикальная скорость касания $V_{y \text{ кас}} < 0$.

Надо отметить, что в зависимости от модуля вертикальной скорости касания различают три вида посадки:

- мягкая посадка ($|V_{y \text{ кас}}| \leq 0,5...0,6$ м/с);
- жесткая посадка ($0,6$ м/с $< |V_{y \text{ кас}}| \leq 1,2$ м/с);
- очень жесткая посадка ($1,2$ м/с $< |V_{y \text{ кас}}|$).

С учетом указанного выше недостатка экспоненциального выравнивания кривую выравнивания будем задавать в виде полинома третьего порядка, определяющего зависимость высоты полета от пройденного пути s вдоль оси ВПП:

$$H_{\text{гл.выр}} = \sum_{k=0}^3 a_k s^k. \quad (2)$$

Для определения четырех коэффициентов полинома используем краевые условия, налагаемые на траекторию выравнивания.

Кривая выравнивания будет начинаться в точке начала выравнивания с высотой $H_{\text{н.выр}}$ и будет иметь угол наклона $\theta_{\text{гл}}$. В этой точке будем полагать $s = 0$.

Заканчиваться кривая выравнивания должна на высоте $H_{\text{кас}}$ в точке касания колесами основных стоек шасси поверхности ВПП при значении координаты $s_{\text{кас}}$, определяемом выражением

$$s_{\text{кас}} = s_{\text{рм}} + L_{\text{кас}} - L_{\text{рм}}, \quad (3)$$

где $s_{\text{рм}}$ — расстояние до глissадного радиомаяка от точки начала выравнивания: $s_{\text{рм}} = \frac{H_{\text{н.выр}}}{\text{tg}\theta_{\text{гл}}}$; $L_{\text{кас}}$ —

заданное расстояние точки касания ВПП от начала ВПП; $L_{\text{рм}}$ — расстояние от начала ВПП до глissадного радиомаяка.

Наконец, в качестве четвертого условия для определения кривой выравнивания потребуем, чтобы в точке касания угол наклона траектории был равен нулю:

$$\frac{\partial H_{\text{гл.выр}}}{\partial s}(s_{\text{кас}}) = 0. \quad (4)$$

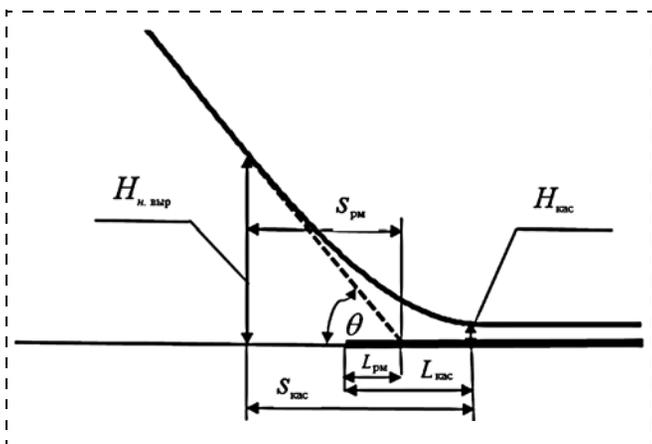


Рис. 1. Основные параметры для определения заданной траектории выравнивания

Заданные краевые условия для кривой выравнивания поясняет рис. 1.

Таким образом, кривая выравнивания заканчивается в точке касания на высоте $H_{\text{кас}}$ при выполнении условия (4).

Два начальных и два конечных условия определяют коэффициенты кривой выравнивания:

$$a_0 = H_{\text{н.выр}}, a_1 = -\text{tg}\theta_{\text{гл}}, a_2 = \frac{\Delta_1}{\Delta}, a_3 = \frac{\Delta_2}{\Delta},$$

где

$$\Delta = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}, \Delta_1 = b_1a_{22} - b_2a_{12},$$

$$\Delta_2 = b_2a_{11} - b_1a_{21}, a_{11} = s_{\text{кас}}^2,$$

$$a_{12} = a_{11}s_{\text{кас}}, a_{21} = 2s_{\text{кас}}, a_{22} = 3a_{11},$$

$$b_1 = \text{tg}\theta_{\text{гл}}s_{\text{кас}} - H_{\text{н.выр}} + H_{\text{кас}}, b_2 = \text{tg}\theta_{\text{гл}}.$$

Таким образом, для построения траектории выравнивания должны быть заданы четыре параметра: $\theta_{\text{гл}}$, $H_{\text{н.выр}}$, $H_{\text{кас}}$ и $s_{\text{кас}}$.

Высота $H_{\text{кас}}$ — это расстояние центра тяжести БЛА от поверхности ВПП в момент касания основными колесами ВПП. Она определяется геометрическими параметрами самолетного шасси и углом атаки (тангажа) в момент касания ВПП. Значения посадочного угла атаки при одном и том же значении скорости будет, в свою очередь, зависеть от массы БЛА на момент посадки. Для рассматриваемого БЛА при посадочном угле атаки $9...11^\circ$ высота $H_{\text{кас}}$ лежит в диапазоне 1,7...2,0 м.

Таким образом, заданная траектория полной посадки будет состоять из траектории прямолинейного снижения по глиссаде и криволинейного участка выравнивания, заданного полиномом (2).

Если глиссада имеет виртуальный характер, то признаком входа в глиссаду и начала снижения по прямому ее участку будет сигнал достижения самолетом оставшейся дальности $D_{\text{вход}}$ до начала ВПП:

$$D_{\text{вход}} = H_{\text{гл.вх.прям}}/\text{tg}\theta_{\text{гл}} - L_{\text{рм}}.$$

В процессе посадки с уменьшением высоты происходит также и уменьшение скорости полета. Так,

например, для БЛА рассматриваемого типа скорость на входе в глиссаду $V_{\text{гл.вх.прям}}$ может лежать в пределах 320...350 км/ч, а в момент касания ВПП скорость касания $V_{\text{кас}}$ должна быть в диапазоне 250...260 км/ч.

Задача автоматического управления состоит в реализации в процессе посадки заданной с помощью виртуальной глиссады высоты полета и заданной скорости полета. Будем полагать, что заданная скорость в ходе посадки меняется в зависимости от пройденного пути по линейному закону от значения $V_{\text{гл.вх.прям}}$ до значения $V_{\text{кас}}$ в момент касания основных колес поверхности ВПП.

Для управления высотой полета используется поворотный стабилизатор (или руль высоты), а заданная скорость полета реализуется через автомат тяги силовой установки.

Кроме непрерывного управления стабилизатором и тягой силовой установки в процессе посадки выдаются также дискретные сигналы управления механизацией крыла, выпуском шасси, а также сигналы включения тормозной системы колес шасси. Все управление автоматической посадкой реализуется с использованием управляющей бортовой цифровой вычислительной машины.

Для управления посадкой БЛА в процессе снижения по прямому участку глиссады и по траектории выравнивания используются алгоритмы отслеживания заданных значений высоты и скорости полета.

Управление тормозами колес основных стоек шасси при пробеге БЛА по ВПП не рассматривалось, но предполагалось что автомат торможения управляет проскальзыванием колес так, что реализуется торможение, близкое к оптимальному.

Оценка работоспособности и эффективности алгоритма управления

Для оценки работоспособности алгоритмов автоматической посадки БЛА на наземный аэродром с бетонной ВПП было выполнено численное моделирование режима полной посадки.

Предварительно был осуществлен взлет БЛА и вывод его в установившийся горизонтальный полет на высоте 250 м со скоростью 320 км/ч. Поэтому пройденный путь X_g и время полета в приводимых ниже результатах моделирования отсчитывались от точки и момента старта БЛА при его взлете.

Точка касания основными колесами поверхности ВПП была задана на расстоянии 350 м от начала ВПП при значении $L_{\text{рм}} = 150$ м. Высота полета в точке начала выравнивания $H_{\text{н.выр}} = 30$ м, а $H_{\text{кас}} = 1,8$ м.

На рис. 2 показано изменение скорости и высоты полета в процессе взлета и полной посадки.

При значении пройденного пути $X_g = 20\,700$ м проведен выпуск носков и закрылков (рис. 2). Реакцией на это было увеличение высоты полета на 6,5 м, которое далее было устранено. В точке выхода на прямой участок глиссады ($X_g = 21\,800$ м) БЛА

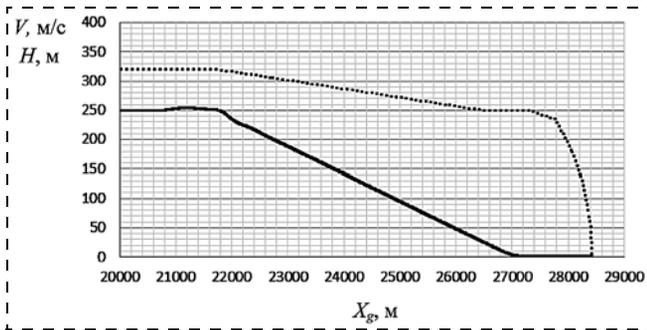


Рис. 2. Изменение высоты (сплошная линия) и скорости (пунктирная линия) полета в процессе полной посадки

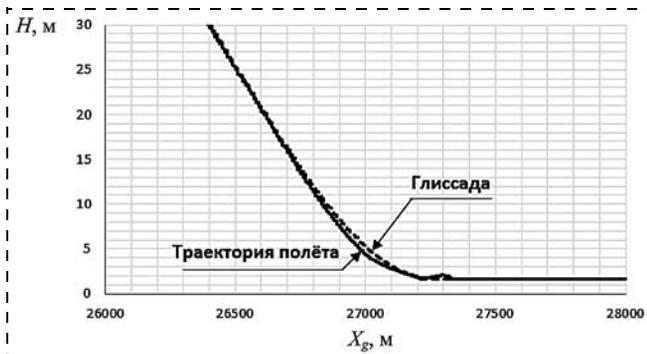


Рис. 3. Изменение высоты полета и глиссады, заданной кривой выравнивания

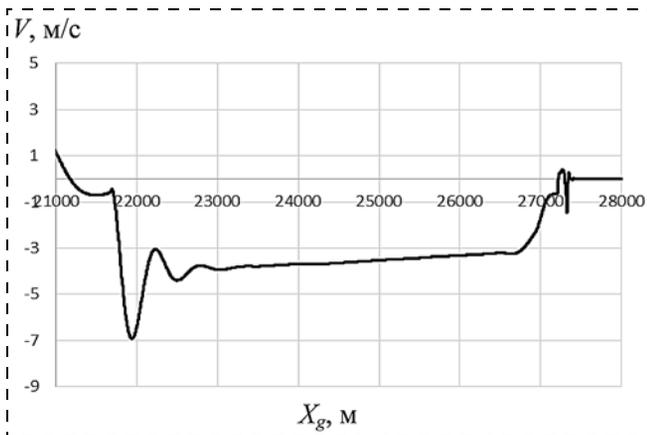


Рис. 4. Изменение вертикальной скорости БПЛА в процессе полной посадки

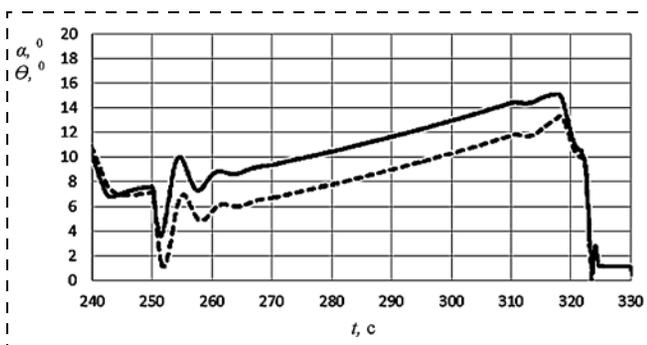


Рис. 5. Изменение углов атаки (сплошная линия) и тангажа (штриховая линия) в процессе полной посадки

имел заданные параметры полета: $V = 320$ км/ч и $H = 250$ м.

По прямому участку глиссады (см. рис. 2) снижение проводилось до точки начала выравнивания с постепенным уменьшением скорости полета. Выравнивание началось на высоте 30 м при скорости 250 км/ч, при этом $X_g = 26\,400$ м. Таким образом, снижение по прямой происходило на участке длиной 4600 м.

Процесс выравнивания закончился в точке касания ($X_g = 27\,220$ м) и длился по времени 12 с. Высота центра массы БЛА над поверхностью ВПП составляла 1,74 м.

После касания основными колесами за счет управления стабилизатором осуществлялось опускание носа БЛА до контакта носового колеса с поверхностью ВПП, уборка носков и закрылков, а также перевод двигателей на режим малого газа. Торможение начиналось автоматически при значении скорости 235 км/ч.

Весь наземный участок качения БЛА по ВПП без выпуска тормозного парашюта составил 1350 м ($X_g = 13\,000$ м), что соответствует данным, приводимым в инструкции летчику для ЛА такого класса.

На рис. 3 более подробно показано изменение высоты центра массы БЛА над поверхностью ВПП в процессе выравнивания траектории.

В точке остановки в конце пробега высота центра массы БЛА над поверхностью ВПП составляла 1,65 м.

На рис. 4 показан график изменения вертикальной скорости БПЛА при снижении на последнем участке прямой глиссады, на участке выравнивания и в момент касания БПЛА ВПП. Как видно из графика, при снижении на последнем участке прямой глиссады вертикальная скорость была равна $-3,3$ м/с, а в точке касания ($X_g = 27\,220$ м) вертикальная скорость имела значение 0,6 м/с.

Как видно из графика на рис. 5, при $t = 242$ с начался процесс перехода из горизонтального полета на участок снижения по прямой глиссаде, что и привело к колебанию угла атаки в этом процессе. При снижении по глиссаде угол атаки постепенно увеличивался, компенсируя уменьшение скорости полета с 320 км/ч до значения 250 км/ч, и достигал максимального значения 15° .

В процессе выравнивания траектории угол атаки монотонно уменьшался и в точке касания имел значение 10° .

На рис. 6 показано изменение угла поворота стабилизатора в процессе выравнивания траектории и качения по ВПП.

Интенсивная работа стабилизатора наблюдается в момент, предшествующий касанию ВПП, и в момент опускания носовой стойки.

Работа привода стабилизатора в данном случае не моделировалась, но ограничивалась максимальной скоростью поворота стабилизатора значением 30° в секунду при ограничении углов поворота диапазоном $-35 \dots +15^\circ$.

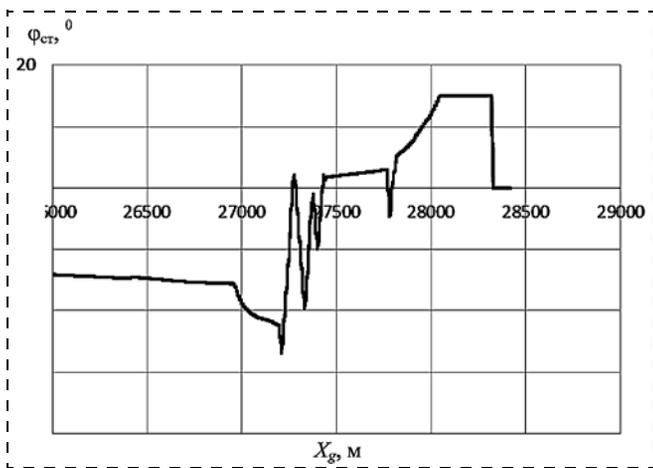


Рис. 6. Изменение угла поворота стабилизатора в процессе выравнивания траектории и качения по ВПП

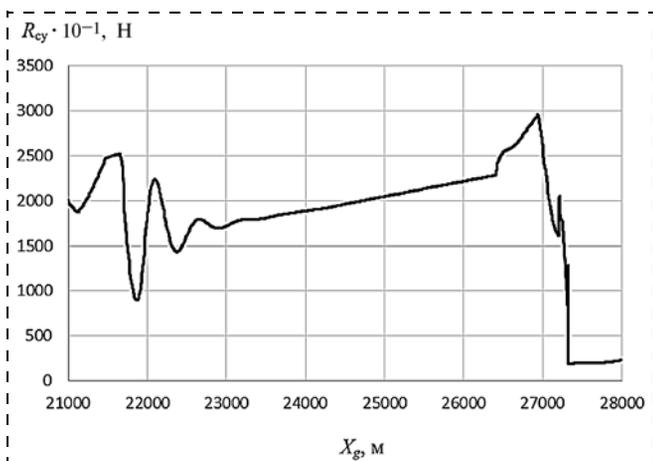


Рис. 7. Изменение тяги силовой установки в процессе полной посадки

На рис. 7 показано изменение тяги силовой установки в процессе полной посадки. Активная работа автомата тяги наблюдается при выходе на посадочную глиссаду, а также при завершении режима выравнивания. На участке торможения при постоянном значении угла поворота РУД ($\delta_{\text{РУД}} = 20^\circ$) наблюдается незначительный рост тяги, обусловленный падением скорости БПЛА при его торможении. Остановка БПЛА происходит за счет его удерживания тормозами основных колес шасси.

Таким образом, результаты моделирования режима полной посадки подтверждают обоснованность выбора траектории выравнивания в виде полинома третьего порядка (2). При таком виде желаемой траектории выравнивания обеспечивается мягкая посадка БЛА, исключая возможность возникновения аварийных ситуаций в момент перехода траектории воздушного полета в движение по поверхности ВПП аэродрома.

Список литературы

1. Аюпов А. И., Алакоз Г. М., Беккиев А. Ю., Кутахов В. П., Плякота С. И. Беспилотники. Проблемы создания и внедрения // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского. 2015. № 3. С. 22–33.
2. Моисеев В. С. Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами. Казань: ГБУ "Республиканский центр мониторинга качества образования", 2013. 768 с.
3. Телухин С. В., Матвеев В. В. Беспилотный летательный аппарат как объект управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 10. С. 54.
4. Александров А. А., Кабанов С. А. Оптимизация посадки беспилотного летательного аппарата с учетом ограничений на управление // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 2. С. 50–54.
5. Ерёмин Е. М., Русский А. В. Способ расчета оценки максимально допустимой взлетной массы беспилотного летательного аппарата на этапе его проектирования // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2014. № 1 (121). С. 39–42.
6. Харьков В. П. Алгоритм управления относительным положением беспилотных летательных аппаратов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2015. Т. 13. № 5. С. 33–40.
7. Кулифеев Ю. Б., Алексеев Э. О. Алгоритм обработки заданной траектории движения самолета по взлетно-посадочной полосе // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 10. С. 73–78.
8. Косьянчук В. В., Сельвесюк Н. И., Чуянов Г. А. Проблемные вопросы развития технологий создания бортового оборудования летательных аппаратов военного назначения // Вооружение и экономика. 2013. № 4 (25). С. 42–48.
9. Макаренко В. Г., Богомолов А. В., Рудаков С. В., Подорожник А. А. Технология построения инерциально-спутниковой навигационной системы управления транспортными средствами с нейросетевой оптимизацией состава вектора измерений // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 1. С. 39–44.
10. Парамонов П. П., Сабо Ю. И., Шукалов А. В., Матвеев В. В., Распопов В. Я. Интегрированная навигационная система для малоразмерного летательного аппарата // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 10. С. 60–67.
12. Кукушкин Ю. А., Богомолов А. В., Ушаков И. Б. Математическое обеспечение оценивания состояния материальных систем // Информационные технологии. 2004. № 7 (приложение). 32 с.
13. Крутько П. Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Нелинейные модели. М.: Наука, 1988. 328 с.
14. Техника пилотирования и самолетовождения самолета МиГ-29. Методическое пособие летчику. М.: Воениздат, 1968. 158 с.
15. Котик М. Г. Динамика взлета и посадки самолетов. М.: Машиностроение, 1984. 256 с.

Trajectory Optimization of a Heavy Unmanned Aerial Vehicle at the Stage of Full Landing

Yu. B. Kulifeyev, 7108113@mail.ru✉,

Uspensky Avionics Moscow Research and Production Complex, 127055, Russian Federation,
M. M. Mironova, 7108113@mail.ru, Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, 125993, Russian Federation

Corresponding author: Kulifeyev Yury B., D.Sc, Professor, Chief Officer,
Uspensky Avionics Moscow Research and Production Complex,
Moscow, 127055, Russian Federation, e-mail: aazhdanov@ipmce.ru

Landing of UAV of an airplane-type is a complicated and potentially dangerous final stage of the flight. Success of landing depends on such factors as UA V flight performance, landing descent trajectory configuration, capabilities of the onboard equipment used for landing, aerodrome characteristics, capabilities of the aerodrome landing systems, as well as the meteorological conditions in the landing area. Generally, now at the stage of field landing UA V descends along a straight glide path with a slope within 2...3 degrees down to a runway contact with the landing gear. In case of such a descent without a flare path UA V landing is hard, which is especially undesirable for heavy UAVs. The technique of optimization of the descent path of a heavy unmanned aircraft of an airplane-type ensures a soft landing on the airfield ground. As the object of the study a heavy class drone of an airplane-type was selected. A mathematical model of the object included aerodynamic and dynamic model of the spatial movement of the unmanned aerial vehicle as a rigid body, a model of the two traction motor propulsion system, an elastic model of the tricycle landing gear with a turning nose strut and models of wind disturbances. For control of the movement of the unmanned aerial vehicle the algorithms for automatic control were used, synthesized by the method of the inverse problems of dynamics. In order to resolve the desired descent path of an unmanned aerial vehicle's landing on the airfield ground to a halt mathematical modeling was used. The results of the mathematical simulation mode fully confirm the validity of the choice of the path alignment as a third-order polynomial. In this type of alignment the desired trajectory ensures a soft landing of an unmanned aircraft, which excludes the possibility of emergency situations in the moment of transition in the flight path of the air traffic on the surface of the runway.

Keywords: drone, flight and navigation system of an unmanned aircraft, longitudinal motion model of an unmanned aerial vehicle, straight stretch of decline, leveling curve, landing of an unmanned aircraft

For citation:

Kulifeyev Y. B., Mironova M. M. Trajectory Optimization of a Heavy Unmanned Aerial Vehicle at the Stage of Full Landing, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 67–72.

DOI: 10.17587/mau/17.67-72

References

1. **Ajupov A. I., Alakoz G. M., Bekkiev A. Ju., Kutahov V. P., Pljaskota S. I.** *Bespilotniki. Problemy sozdaniya i vnedreniya* (Drones. Problems of creation and implementation), *Nauchnye chteniya po aviatsii, posvjashchennye pamjati N.E. Zhukovskogo*, 2015, no. 3, pp. 22–33 (in Russian).
2. **Moiseev V. S.** *Prikladnaja teorija upravlenija bespilotnymi letatel'nyimi apparatami* (Applied control theory unmanned aerial vehicle), Kazan': GBU "Respublikanskij centr monitoringa kachestva obrazovaniya", 2013, 768 p. (in Russian).
3. **Teluhin S. V., Matveev V. V.** *Bespilotnyj letatel'nyj apparat kak ob'ekt upravlenija* (Unmanned aerial vehicle as a control object), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2008, no. 10, p. 54 (in Russian).
4. **Aleksandrov A. A., Kabanov S. A.** *Optimizacija posadki bespilotnogo letatel'nogo apparata s uchetom ogranichenij na upravlenie* (Optimizing landing unmanned aerial vehicle within the constraints of managing), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2008, no. 2, pp. 50–54 (in Russian).
5. **Erjomin E. M., Russkin A. V.** *Sposob rascheta ocenki maksimal'no dopustimoj vzletnoj massy bespilotnogo letatel'nogo apparata na jetape ego proektirovaniya* (The method for calculating the maximum allowable assessment takeoff weight unmanned aerial vehicle at the stage of its design), *Oboronnyj kompleks-Nauchno-Tehnicheskomu Progressu Rossii*, 2014, no. 1 (121), pp. 39–42 (in Russian).
7. **Har'kov V. P.** *Algoritm upravlenija otositel'nyh polozhenij bespilotnyh letatel'nyh apparatov* (The control algorithm relative position drones), *Informacionno-Izmeritel'nye I Upravljajushhie Sistemy*, 2015, vol. 13, no. 5, pp. 33–40 (in Russian).
8. **Kulifeyev Ju. B., Alekseev Je. O.** *Algoritm otrabotki zadannoj traektorii dvizhenija samoleta po vzletno-posadochnoj polose* (The algorithm is working off the desired path of the aircraft on the runway), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2007, no. 10, pp. 73–78 (in Russian).
9. **Kos'janchuk V. V., Sel'vesjuk N. I., Chujanov G. A.** *Problemye voprosy razvitiya tehnologij sozdaniya bortovogo oborudovaniya letatel'nyh apparatov voennogo naznacheniya* (Problematic issues of development technologies for creating on-board equipment of aircraft for military use), *Vooruzhenie i Jekonomika*, 2013, no. 4 (25), pp. 42–48 (in Russian).
10. **Makarenko V. G., Bogomolov A. V., Rudakov S. V., Podorozhnik A. A.** *Tehnologija a postroeniya inercial'no-sputnikovoj navigacionnoj sistemy upravlenija transportnymi sredstvami s nejrosetevoj optimizaciej sostava vektora izmerenij* (Technology of construction of inertial-satellite navigation system vehicle management with optimization of neural network structure measurement vector), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2007, no. 1, pp. 39–44 (in Russian).
11. **Paramonov P. P., Sabo Ju. I., Shukalov, A. V., Matveev V. V., Paspopov V. Ja.** *Integrirovannaja navigacionnaja sistema dlja malorazmernogo letatel'nogo apparata* (The integrated navigation system for small-sized aircraft), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2010, no. 10, pp. 60–67 (in Russian).
12. **Kukushkin Ju. A., Bogomolov A. V., Ushakov I. B.** *Matematicheskoe obespechenie ocenivaniya sostojaniya material'nyh sistem* (Software of state estimation of material systems), *Informacionnye Tehnologii*, 2004, no. 7 (prilozhenie), 32 p. (in Russian).
13. **Krut'ko P. D.** *Obratnye zadachi dinamiki upravljajemyh sistem. Nelinejnye modeli* (Inverse problems of the dynamics of control systems. Nonlinear models), Moscow, Nauka, 1988, 328 p. (in Russian).
14. **Tehnika pilotirovaniya i samoljotovozhdenija samoljota MiG-29. Metodicheskoe posobie ljotchiku** (Piloting technique and samoljotovozhdeniya MiG-29. Toolkit pilots), Moscow, Voenizdat, 1968, 158 p. (in Russian).
15. **Kotik M. G.** *Dinamika vzleta i posadki samoletov* (Dynamics of takeoff and landing aircraft), Moscow, Mashinostroenie, 1984, 256 p. (in Russian).

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: (499) 269-5397, тел./факс: (499) 269-5510

Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *Т. В. Пчелкина*.

Сдано в набор 02.11.2015. Подписано в печать 11.12.2015. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН116. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

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