

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 16

2015

№ 8

Издается с 2000 года

ISSN 1684-6427

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Редакционный совет:

CHYI-YEU LIN, PhD, prof.
GROUMPOS P. P., prof., Greece
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.
ЩЕРБАТЮК А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
ЮСУПОВ Р. М., чл.-корр. РАН, проф.

Главный редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с. н. с.

Заместители гл. редактора:

ПОДУРАЕВ Ю. В., д. т. н., проф.
ПУТОВ В. В., д. т. н., проф.
ЮЩЕНКО А. С., д. т. н., проф.

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСАНДРОВ В. В., д. ф.-м. н., проф.
АНТОНОВ Б. И.
АРШАНСКИЙ М. М., д. т. н., проф.
БУКОВ В. Н., д. т. н., проф.
ВИТТИХ В. А., д. т. н., проф.
ГРАДЕЦКИЙ В. Г., д. т. н., проф.
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

- Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** О проблеме согласного-параллельной коррекции систем регулирования 507
- Кабанов А. А.** Приближенная линеаризация обратной связью на основе сингулярно возмущенного подхода 515

УПРАВЛЕНИЕ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

- Пшихопов В. Х., Медведев М. Ю.** Адаптивное позиционное управление подвижными объектами, не линеаризуемыми обратной связью 523
- Зенкевич С. Л., Галустьян Н. К.** Синтез и апробация алгоритма управления движением квадрокоптера по траектории 530
- Сапунков Я. Г., Молоденков А. В.** Алгоритм оптимального по энергии разворота космического аппарата при произвольных граничных условиях 536

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

- Лохин В. М., Манько С. В., Александрова Р. И., Диане С. А. К., Панин А. С.** Механизмы интеллектуальных обратных связей, обработки знаний и самообучения в системах управления автономными роботами и мультиагентными робототехническими группировками 545

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

- Загашвили Ю. В., Савченко Г. Б., Филимонов Ю. Н.** Идентификация статических характеристик газогенератора синтез-газа 556
- Шукалов А. В., Жаринов И. О., Жаринов О. О., Костишин М. О., Нечаев В. А.** Алгоритм решения проектной задачи выбора оптических параметров бортового средства индикации на основе жидкокристаллической панели 563
- Щёкин А. В., Сульдин С. П.** Ассоциативность траекторий в САМ-приложении "Модуль ЧПУ. Токарная обработка" 570

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

CONTENTS

METHODS OF THE THEORY OF AUTOMATIC CONTROL

Filimonov A. B., Filimonov N. B. On the Problem of a Parallel Feedforward Correction of Regulation Systems 507

Kabanov A. A. Approximate Feedback Linearization Based on the Singular Perturbations Approach. 515

MOVING OBJECT CONTROL

Pshikhopov V. Kh., Medvedev M. Yu. Adaptive Position-Path Control of Vehicles without a Feedback Linearization 523

Zenkevich S. L., Galustyan N. K. Algorithm for Quadrocopter Trajectory Control and Flight Modeling 530

Sapunkov Ya. G., Molodenkov A. V. Algorithm for the Optimal Turn of a Spacecraft in the Sense of the Minimal Energy Loss under Arbitrary Boundary Conditions 536

INTELLIGENT TECHNOLOGIES IN THE ROBOT-TECHNICAL SYSTEMS

Lokhin V. M., Manko S. V., Alexandrova R. I., Diane S. A. K., Panin A. S. Intelligent Feedback, Knowledge Processing and Self Learning in the Control Systems of the Autonomous Robots and Multi-Agent Robotic Groups 545

MODELING AND DESIGN AUTOMATION

Zagashvili Yu. V., Savchenko G. B., Filimonov Yu. N. Identification of the Static Characteristics of the Synthesis Gas Generators 556

Shukalov A. V., Zharinov I. O., Zharinov O. O., Kostishin M. O., Nechayev V. A. Algorithm for Selection of the Optical Parameters of the On-Board Indication Equipment Based on a Liquid Crystal Panel 563

Schekin A. V., Suldin S. P. Associativity of the Tool Paths in the CAM-Application "CNC-Module. Lathe Operation" 570

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

А. Б. Филимонов¹, д-р техн. наук, профессор, filimon_ab@mail.ru,

Н. Б. Филимонов², д-р техн. наук, профессор, nbfilimonov@mail.ru,

¹МИРЭА, МГУПИ, г. Москва

²МГУ им. М. В. Ломоносова; ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва

О проблеме согласно-параллельной коррекции систем регулирования*

Рассматриваются некоторые аспекты проблемы согласно-параллельной коррекции (СПК) систем автоматического регулирования. Данный тип коррекции слабо изучался в рамках классической теории автоматического регулирования и практически не затрагивается в современных исследованиях. Предметом исследований настоящей работы является естественный вопрос — может ли быть полезен данный тип коррекции разработчикам САР? В работе рассматриваются три способа применения СПК: компенсация передаточных полюсов канала управления, управление его передаточными нулями, коррекция амплитудно-фазовых характеристик разомкнутой системы. Итогом СПК является эффект желаемого изменения передаточных и частотных характеристик канала управления, недостижимый в рамках классических методов коррекции и весьма полезный для решения ряда задач регулирования.

Ключевые слова: системы автоматического управления, согласно-параллельная коррекция, компенсация передаточных полюсов, управление передаточными нулями, коррекция амплитудно-фазовых характеристик, робастность, бесконечно большой коэффициент усиления

Введение

Классическая концепция обеспечения желаемого динамического качества систем автоматического регулирования (САР) основана на принципе коррекции (исправления) динамических характеристик исходной системы посредством специальных корректирующих звеньев (КЗ). По характеру включения в систему различают следующие типы КЗ [1, § 10.3; 2, п. 4.8]: последовательное (включается последовательно с другими элементами прямой цепи системы), согласно-параллельное или просто параллельное (включается параллельно с другими элементами прямой цепи системы), а также встречно-параллельное, или местная обратная связь (включается в цепь местной обратной связи, охватывающей какие-либо элементы прямой цепи системы). Следует заметить, что во многих отечественных литературных источниках рассматривают лишь два типа КЗ — последовательное и параллельное, причем под последним понимается встречно-параллельное КЗ (см., например, весьма популярные книги — монографию [3, гл. VIII, п. 5], учебники [4, гл. 9, п. 4; 5, гл. 1, п. 1] и энциклопедию [6, гл. 1.8, п. 1.8.2]).

В классической и современной теории автоматического регулирования (например, в широко известных учебниках Н. Н. Ивашенко, Г. Ф. Зайцева, В. С. Михайлова, Е. П. Попова, А. В. Нетушила и др.) упор делается на двух типах коррекции: последовательной и встречно-параллельной, в то же время

третий тип коррекции — согласно-параллельная коррекция (СПК), как правило, остается за гранью внимания. Кстати, в переведенных на русский язык популярных зарубежных учебниках по системам управления [7—9] вообще отсутствует даже упоминание о данном типе коррекции.

Среди современных исследований по проблематике СПК отметим отечественные [10; 11; 12, п. 12.7; 13, п. 6.6] и зарубежные [14—17] работы в области синтеза адаптивных регуляторов с неявной эталонной моделью с использованием параллельного компенсатора, или "шунта" (именуемого в англоязычной литературе Parallel Feedforward Compensator, или Shunt). Упомянем также работы авторов [18, 19] и зарубежные публикации [20—27], в которых СПК ориентированы на обеспечение требований свойства робастности синтезируемой САР.

Мы вправе констатировать слабую теоретическую проработку проблематики СПК. Имеет ли смысл применять данный тип коррекции, и если да, то в каких случаях и каковы при этом функциональные возможности СПК? Данные вопросы до сих пор остаются открытыми, хотя не могут не представлять интереса для теории и практики автоматического регулирования. Цель настоящей работы — восполнить этот пробел.

Будем рассматривать функциональную структуру САР, показанную на рис. 1. Здесь объект — неизменяемая часть системы, к которой параллельно подключено КЗ, так что процесс регулирования реализуется совместным действием КЗ и регулятора. Результатом коррекции является составная система,

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

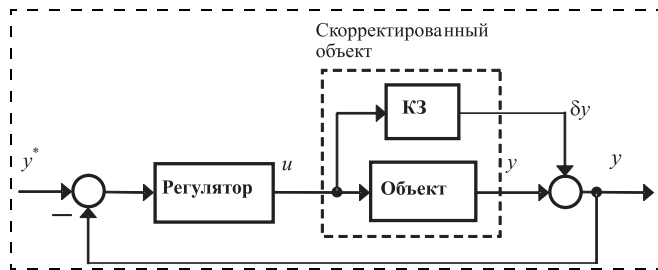


Рис. 1

образованная согласно-параллельным подключением КЗ к объекту, которую далее условимся называть *скорректированным объектом*.

В схеме на рис. 1 приняты следующие обозначения: u — управляющий вход объекта, y — его выход, y^* — уставка (задание), δy — выход КЗ, $\tilde{y}$ — выход скорректированного объекта:

$$\tilde{y} = y + \delta y.$$

Примем следующее допущение: объект является линейной стационарной динамической системой n -го порядка, вполне управляемой и наблюдаемой.

Далее полагаем, что решается задача *линейной коррекции*.

Обозначим через $W_0(s)$, $W_1(s)$, $\tilde{W}_0(s)$ передаточные функции соответственно объекта, корректирующего звена и скорректированного объекта. Здесь и далее s — комплексная частота. Результат коррекции описывается соотношением

$$\tilde{W}_0(s) = W_0(s) + W_1(s). \quad (1)$$

Коррекция линейных стационарных систем скажется на их модальной структуре. Уточним ряд соответствующих понятий модального анализа.

Под *спектром* линейной стационарной системы будем понимать совокупность всех корней ее характеристического многочлена. Спектр естественно интерпретировать как мультимножество в случае необходимости учета кратности точек спектра. Заметим, что полюсы передаточной функции системы являются точками ее спектра.

Если λ — точка спектра системы, то под модами данной системы с *показателем* λ будем понимать ее свободные движения вида

$$\xi(t) = e^{\lambda t} \pi(t),$$

где $\pi(t)$ — алгебраический многочлен от переменной t , т. е. *моды* — это составляющие свободного движения системы, соответствующие ее определенным точкам спектра. Всякое свободное движение системы представимо в виде суперпозиции некоторых возбужденных мод.

Обсудим следующие три варианта использования СПК:

1. Компенсация передаточных полюсов объекта.
2. Управление передаточными нулями объекта.
3. Коррекция АФЧХ объекта.

1. Компенсация передаточных полюсов

Компенсация передаточных полюсов объекта направлена на их исключение из передаточной функции канала управления.

Далее Λ_0 — спектр объекта. Положим, что он разбит на два непересекающихся подмножества, симметричных относительно вещественной оси:

$$\Lambda_0 = \Lambda_{0,1} \cup \Lambda_{0,2}.$$

Данное разбиение порождает соответствующее спектральное разложение передаточной функции (ПФ):

$$W_0(s) = W_0(\Lambda_{0,1}, s) + W_0(\Lambda_{0,2}, s), \quad (2)$$

где $W_0(\Lambda_{0,1}, s)$ и $W_0(\Lambda_{0,2}, s)$ — рациональные дроби, причем полюсы первой принадлежат спектральному множеству $\Lambda_{0,1}$, а второй — спектральному множеству $\Lambda_{0,2}$. Данный результат прямо вытекает из основной теоремы о рациональных дробях [28], гласящей, что каждая правильная рациональная дробь может быть разложена, и притом единственным образом, в сумму простейших дробей.

Разложение (2) означает декомпозицию объекта на две параллельно соединенные подсистемы с передаточными функциями $W_0(\Lambda_{0,1}, s)$ и $W_0(\Lambda_{0,2}, s)$.

Передаточную функцию корректирующего звена примем равной

$$W_1(s) = -W_0(\Lambda_{0,2}, s).$$

Тогда согласно (1) и (2) ПФ скорректированного объекта будет равна

$$\tilde{W}_0(s) = W_0(\Lambda_{0,1}, s).$$

Таким образом, в данной схеме КЗ выступает в роли компенсатора передаточных полюсов $\lambda \in \Lambda_{0,2}$ в канале управления выходной переменной $\tilde{y}$.

Положим, в модальной структуре объекта можно выделить быстро затухающие моды, которым отвечает спектральное множество $\Lambda_0^- \subset \Lambda_0$. Пусть

$$\Lambda_0^+ = \Lambda_0 \setminus \Lambda_0^-.$$

По смыслу данная часть спектра представляет *доминирующие* полюсы передаточной функции объекта.

Обратимся к описанной компенсационной схеме, полагая

$$\Lambda_{0,1} = \Lambda_0^+ \text{ и } \Lambda_{0,2} = \Lambda_0^-.$$

Тогда получим следующее выражение для передаточной функции *скорректированного* канала управления:

$$\tilde{W}_0(s) = W_0(\Lambda_0^+, s).$$

Пример 1. Пусть

$$W_0(s) = \frac{1}{(T_{0,1}s + 1)(T_{0,2}s + 1)(T_{0,3}s + 1)},$$

причем $0 < T_{0,2}, T_{0,3} \ll T_{0,1}$. Положим

$$\Lambda_0^+ = \left\{ -\frac{1}{T_{0,1}} \right\}, \quad \Lambda_0^- = \left\{ -\frac{1}{T_{0,2}}, -\frac{1}{T_{0,3}} \right\}.$$

Тогда

$$W_0(\Lambda_0^+, s) = \frac{K_{0,1}}{T_{0,1}s + 1},$$

$$W_0(\Lambda_0^-, s) = \frac{K_{0,2}}{T_{0,2}s + 1} + \frac{K_{0,3}}{T_{0,3}s + 1},$$

где

$$K_{0,1} = \frac{1}{\left(1 - \frac{T_{0,2}}{T_{0,1}}\right)\left(1 - \frac{T_{0,3}}{T_{0,1}}\right)} \approx 1,$$

$$K_{0,2} = \frac{1}{\left(1 - \frac{T_{0,1}}{T_{0,2}}\right)\left(1 - \frac{T_{0,3}}{T_{0,2}}\right)}, \quad K_{0,3} = \frac{1}{\left(1 - \frac{T_{0,1}}{T_{0,3}}\right)\left(1 - \frac{T_{0,2}}{T_{0,3}}\right)}.$$

Находим передаточную функцию компенсатора и скорректированного объекта:

$$W_1(s) = -\left(\frac{K_{0,2}}{T_{0,2}s + 1} + \frac{K_{0,3}}{T_{0,3}s + 1} \right), \quad \tilde{W}_0(s) = \frac{K_{0,1}}{T_{0,1}s + 1}.$$

Для варианта $T_{0,1} = 5$; $T_{0,2} = 0,5$; $T_{0,3} = 0,25$ будем иметь

$$K_{0,1} \cong 1,170; \quad K_{0,2} \cong -0,222; \quad K_{0,3} \approx 0,053. \quad \blacksquare$$

Обратим внимание на следующее побочное действие СПК: коэффициент передачи канала управления изменяется на 17 %.

Отметим важное свойство предложенной компенсационной схемы — она приводит к снижению порядка передаточной функции канала управления и, тем самым, упрощает решаемую задачу управления.

Замечание 1. В работе [29] отмечается структурный аспект эффекта компенсации передаточных нулей и полюсов объекта в схемах последовательной коррекции: она порождает соответственно неуправляемую и ненаблюдаемую подсистемы в составе САР, спектры которых как раз и определяются скомпенсированными нулями и полюсами. Такой же результат имеет место и в описанной схеме компенсации передаточных полюсов — она сопровождается появлением подсистемы, неуправляемой и ненаблюдаемой по каналу "вход — скорректированный выход", причем ее спектр совпадает с Λ_0^- .

Замечание 2. Схема СПК является альтернативой классической схеме последовательной коррекции, причем ее предпочтительная особенность — возможность использования в нелинейных задачах управления, когда заданы ограничения на управ-

ляющий вход и поэтому исключена возможность применения схем последовательной линейной коррекции.

2. Управление передаточными нулями

"Плохие" передаточные нули объекта оказываются ограничительным фактором для возможности применения многих методов синтеза САР. К таким относятся правые нули (т. е. нули с положительной вещественной частью), а также те левые нули, которые близки к мнимой оси. Например, классический метод последовательной коррекции, основанный на концепции *желаемой* ЛАЧХ [3], неприменим к неминимально-фазовым объектам. В связи с этим весьма ценным функциональным свойством СПК оказывается возможность целенаправленно изменять передаточные нули канала управления.

Пример 2. Пусть

$$W_0(s) = \frac{K_0(-\tau s + 1)}{(Ts + 1)(s + 1)},$$

причем $K_0 > 0$, $T \gg 1$, $0 < \tau < 1$. Данная передаточная функция имеет правый ноль, равный $1/\tau$.

Воспользуемся схемой СПК с передаточной функцией

$$W_1(s) = \frac{K_1}{s + 1}, \quad K_1 = \frac{K_0\tau}{T}.$$

В результате коррекции правый ноль передаточной функции объекта исключается из канала управления:

$$\tilde{W}_0(s) = \frac{\tilde{K}_0}{(Ts + 1)(s + 1)},$$

где

$$\tilde{K}_0 = K_0 \left(1 + \frac{\tau}{T}\right).$$

В частности, для варианта $K_0 = 1$, $T = 10$, $\tau = 0,2$ получим

$$K_1 = 0,02 \text{ и } \tilde{K}_0 = 1,02.$$

Заметим, что мы применили малоинерционное корректирующее звено, причем, поскольку $K_1 \ll K_0$, оно практически не изменяет коэффициент передачи канала управления.

Описанная схема СПК также приводит к появлению неуправляемой и ненаблюдаемой подсистемы в структуре скорректированного объекта, которая является источником скрытых мод с показателем $\lambda = -1$. Следовательно, такая коррекция обоснована в случаях, когда скрытые моды можно считать быстрозатухающими по сравнению с быстродействием синтезируемой САР, и поэтому их влиянием на процессы регулирования можно пренебречь.

3. Коррекция АФЧХ

Еще один способ применения СПК — коррекция частотных характеристик прямой цепи САР для обеспечения в замкнутой системе желаемого запаса устойчивости по фазе и амплитуде. Покажем перспективность использования такой коррекции в задачах синтеза САР с большим коэффициентом усиления. Заметим, что теоретический и практический интерес к данному классу систем обусловлен их свойствами инвариантности к действию внешних возмущений и робастностью по отношению к параметрической неопределенности в динамике объекта управления [30].

Согласно (1) комплексная частотная характеристика скорректированного объекта определяется формулой

$$\tilde{W}_0(j\omega) = W_0(j\omega) + W_1(j\omega), \quad (3)$$

где j — мнимая единица, а ω — частота.

Примем следующие допущения: 1) корректируемый объект является минимально-фазовой системой, т. е. не имеет правых передаточных нулей и полюсов; 2) применяется пропорциональный регулятор с передаточной функцией

$$R(s) = K_R = \text{const}. \quad (4)$$

Из частотного критерия устойчивости Найквиста прямо вытекает следующее предложение.

Предложение 1. Замкнутая САР будет устойчива при любом $K_R > 0$ тогда и только тогда, когда ее годограф Найквиста лежит в нижней полуплоскости:

$$\text{Im } W(j\omega) < 0, \quad \omega > 0. \quad \blacksquare \quad (5)$$

Отсюда следует, что для применения схемы регулирования с большим коэффициентом усиления комплексная частотная характеристика скомпенсированного объекта должна обеспечивать выполнение условия (5).

Для пояснения идеи коррекции АФЧХ ограничимся классом объектов с передаточной функцией вида

$$W_0(s) = \frac{K_0}{s^\alpha \prod_{i=1}^p (T_{0,i}s + 1)}, \quad (6)$$

где $K_0 > 0$, $\alpha \in \{0, 1\}$, p — натуральное число, $p \geq 2$, $T_{0,i} > 0$ ($i = 1:p$), причем

$$n = \alpha + p \geq 3. \quad (7)$$

Из (6) и (7) вытекает, что годограф $W_0(j\omega)$ проходит через n квадрантов комплексной плоскости, вследствие чего его высокочастотная часть заходит в верхнюю полуплоскость.

Введем АЧХ и ФЧХ объекта

$$A_0(\omega) = |W_0(j\omega)| = \frac{K_0}{\omega^\alpha \prod_{i=1}^p \sqrt{1 + (\omega T_{0,i})^2}}, \quad (8)$$

$$\varphi_0(\omega) = \arg W_0(j\omega) = -\alpha \frac{\pi}{2} - \sum_{i=1}^p \arctg(\omega T_{0,i}).$$

Критическая частота ω_0 разомкнутой нескорректированной САР определяется первой точкой пересечения годографом $W_0(j\omega)$ отрицательной вещественной полуоси:

$$\omega_0 = \min\{\omega \geq 0 | \varphi_0(\omega) = -\pi\}.$$

В качестве корректирующего звена выберем аperiodическое звено с ПФ

$$W_1(s) = \frac{K_1}{T_1 s + 1}. \quad (9)$$

Находим соответствующие АЧХ, ФЧХ и мнимую частотную характеристику:

$$A_1(\omega) = |W_1(j\omega)| = \frac{K_1}{\sqrt{1 + (\omega T_1)^2}}, \quad \varphi_1(\omega) = -\arctg(\omega T_1),$$

$$V_1(\omega) = \text{Im } W_1(j\omega) = -K_1 \frac{\omega T_1}{1 + (\omega T_1)^2}. \quad (10)$$

Будем полагать, что $K_1 > 0$ и

$$T_1 \leq \max\{T_{0,i}, i = 1:p\}. \quad (11)$$

Предложение 2. Пусть передаточные функции объекта и КЗ определяются выражениями (6) и (9) соответственно. Тогда надлежащим выбором коэффициента усиления K_1 КЗ всегда можно получить АФЧХ скорректированного объекта, удовлетворяющую условиям предложения 1. $\blacksquare$

Доказательство. Нам понадобится следующее утверждение.

Утверждение 1. Если условие

$$A_0(\omega) < -V_1(\omega) \quad (12)$$

выполняется для частоты $\omega = \omega_0$, то оно выполняется и для всех частот $\omega > \omega_0$. $\blacksquare$

Согласно (8) и (10)

$$-\frac{A_0(\omega)}{V_1(\omega)} = \frac{K_0}{K_1} \frac{1 + (\omega T_1)^2}{\omega^{1+\alpha} T_1 \prod_{i=1}^p \sqrt{1 + (\omega T_{0,i})^2}}.$$

Нетрудно убедиться, что благодаря соотношению (11) данное выражение является монотонно убывающей функцией, так что в случае выполнения условий утверждения 1 при $\omega > \omega_0$ будем иметь неравенства

$$-\frac{A_0(\omega)}{V_1(\omega)} < -\frac{A_0(\omega_0)}{V_1(\omega_0)} < 1,$$

что и доказывает утверждение 1.

Следовательно, выбирая параметр K_1 так, чтобы выполнялось соотношение

$$-\frac{A_0(\omega_0)}{V_1(\omega_0)} < 1,$$

мы обеспечим выполнение неравенства (12) для всех частот $\omega > \omega_0$.

Утверждение 2. В случае выполнения условия

$$A_0(\omega) < -V_1(\omega), \quad \omega \geq \omega_0, \quad (13)$$

АФЧХ скорректированного объекта будет лежать в отрицательной полуплоскости:

$$\operatorname{Im} \tilde{W}_0(j\omega) < 0. \quad \blacksquare \quad (14)$$

Согласно (3) имеет место равенство

$$\operatorname{Im} \tilde{W}_0(j\omega) = \operatorname{Im} W_0(j\omega) + \operatorname{Im} W_1(j\omega). \quad (15)$$

Учтем соотношения

$$\operatorname{Im} W_0(j\omega) < 0, \quad 0 < \omega < \omega_0; \quad (16)$$

$$\operatorname{Im} W_1(j\omega) < 0, \quad \omega > 0. \quad (17)$$

Из (15)–(17) следует, что неравенство (14) автоматически выполняется при $0 < \omega < \omega_0$. Пусть $\omega \geq \omega_0$. Учтем неравенство

$$\operatorname{Im} W_0(j\omega) \leq A_0(\omega).$$

Отсюда и из соотношений (15), (12) получаем

$$\operatorname{Im} \tilde{W}_0(j\omega) < A_0(\omega) + \operatorname{Im} W_1(j\omega) < 0. \quad \blacksquare$$

Пример 3. Пусть

$$W_0(s) = \frac{K_0}{s(T_{0,1}s + 1)(T_{0,2}s + 1)},$$

где $K_0 = 1$, $T_{0,1} = 5$, $T_{0,2} = 3$.

Для КЗ примем передаточную функцию вида (9), где $K_1 = 3,5$; $T_1 = 4,5$.

На рис. 2 изображен частотный годограф $W_0(j\omega)$, причем штриховой линией обозначена вертикальная асимптота годографа — к ней он стремится при $\omega \rightarrow 0$. Также показан годограф скорректированного объекта $\tilde{W}_0(j\omega)$. Эти годографы, а также годограф $W_1(j\omega)$ представлены на рис. 3 в увеличенном масштабе. Видно, что $\tilde{W}_0(j\omega)$ лежит в нижней полуплоскости.

Считаем, что применяется пропорциональный регулятор с передаточной функцией (4).

Сравним процессы регулирования в САР с коррекцией и без нее.

Нескорректированная САР. Система теряет устойчивость при достаточно малых коэффициентах усиления регулятора. Критический коэффициент усиления равен $K_R = 0,533$.

При $K_R = 0,2$ спектр замкнутой системы равен

$$\Lambda_0 = \{-0,4511; -0,0411 \pm 0,1669 j\}.$$

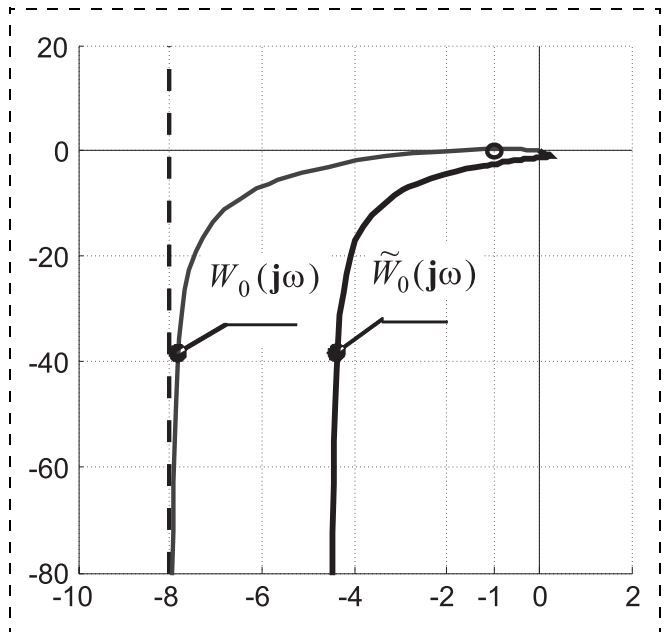


Рис. 2

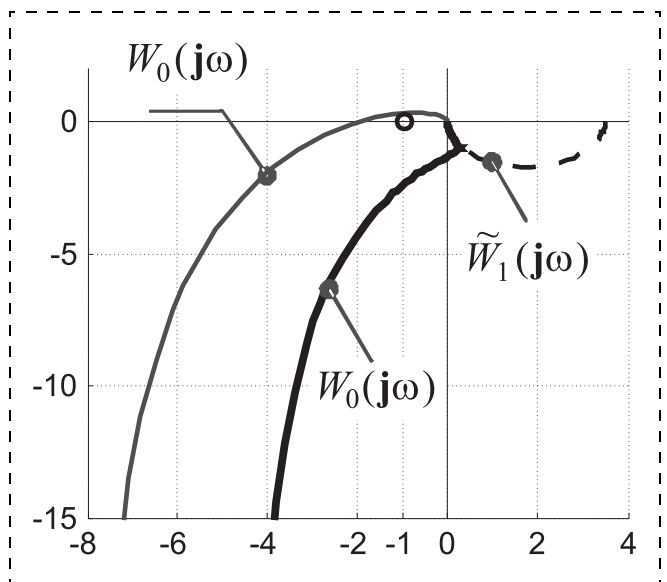


Рис. 3

На рис. 4 представлена ее переходная характеристика. Имеем время регулирования $T_R \approx 65$.

Скорректированная САР. Система оказывается устойчивой при любых $K_R > 0$. В частности, при $K_R = 100$ спектр системы равен

$$\Lambda_0 = \{-0,2307; -78,0; -0,1508 \pm 0,2441 j\}.$$

На рис. 5 показана соответствующая переходная характеристика системы по каналу "установка — скорректированный выход" (время регулирования $\tilde{T}_R \approx 0,039$), а на рис. 6 представлена переходная характеристика системы по каналу "установка — выход" (время регулирования $T_R \approx 18,5$).

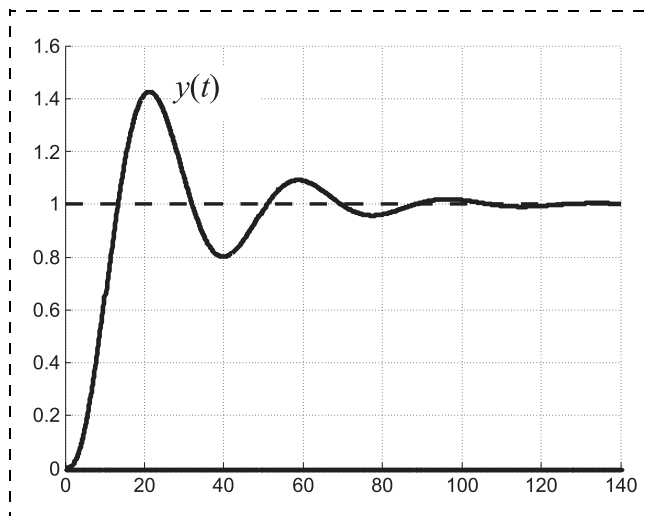


Рис. 4

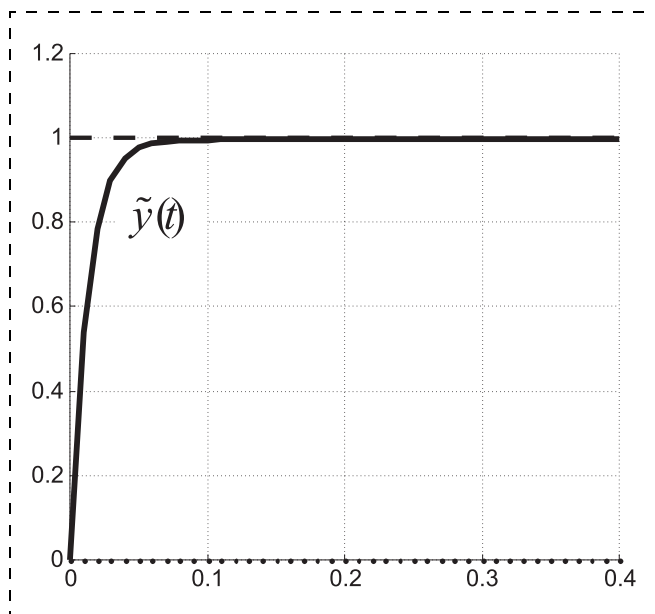


Рис. 5

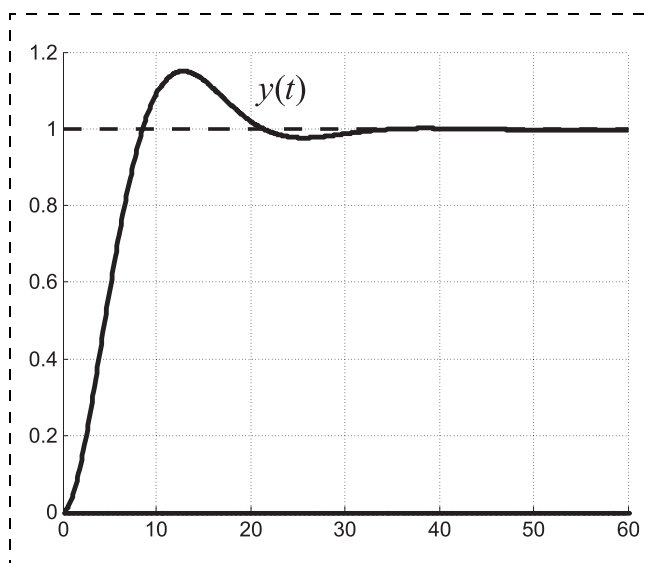


Рис. 6

Приведенный пример демонстрирует способность СПК кардинально изменять характеристики робастности САР.

Отметим весьма любопытное свойство СПК: неограниченное увеличение коэффициента усиления регулятора K_R сопровождается неограниченным уменьшением времени реакции $\tilde{T}_R$ канала "установка — скомпенсированный выход" САР (см. рис. 5). Однако в диапазоне больших значений K_R динамика канала "установка — скомпенсированный выход" оказывается инвариантной к варьированию этого параметра (сравните рис. 6 и рис. 5).

Замечание 3. Важная характеристика коррекции АФЧХ в изложенном примере — астатическое действие на процессы регулирования: она не влияет на установившийся режим замкнутой САР. Данное свойство КЗ обусловлено наличием нулевого полюса в ПФ объекта. Хотя в общем случае объект может не иметь нулевых передаточных полюсов, но эту ситуацию можно искусственно исправить посредством подключения к объекту интегратора. В итоге выстраивается следующее комбинированное решение: сначала в канал управления включается интегратор, и только затем осуществляется необходимая коррекция АФЧХ прямой цепи.

Заключение

В данной статье рассмотрены некоторые аспекты проблематики СПК в задачах синтеза САР, показаны ее функциональные возможности на ряде модельных примеров. Данный тип коррекции может быть весьма полезен в задачах проектирования САР, однако для этого необходима его более обстоятельная теоретическая проработка.

Отметим также два важных аспекта:

1. СПК может быть направлена на коррекцию временных характеристик канала управления. Так, в работах одного из авторов (см., например, [31]) на этом соображении базируется разработанная методология динамической компенсации запаздываний в процессах регулирования.
2. Еще одно перспективное направление применения механизма СПК — это синтез робастных САР в условиях структурно-параметрической неопределенности и действия нелинейных факторов, в основе которого лежит идея *шунтирования* объекта динамическими звеньями с большими коэффициентами усиления. Данный подход также требует дополнительных исследований.

Список литературы

1. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления. СПб.: Профессия, 2003. 752 с. (§ 10.3).
2. Теория автоматического управления / С. Е. Душин и др.; Под ред. В. Б. Яковлева. М.: Высшая школа, 2003. 567 с. (п. 4.8).
3. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования. Кн. 2. Анализ и синтез линейных непрерывных и дискретных систем автоматического регулирования / Колл. авторов. Под ред. В. В. Солодовникова. М.: Машиностроение, 1967. 682 с.

4. **Топчиев Ю. И.** Атлас для проектирования систем автоматического регулирования. М.: Машиностроение, 1989. 752 с.
5. **Методы** классической и современной теории автоматического управления. Учебник в 3-х т. Т. 2. Синтез регуляторов и теории оптимизации систем автоматического управления / Под ред. Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 736 с.
6. **Машиностроение.** Энциклопедия в 40 т. Т. I—4. Автоматическое управление. Теория / Колл. авторов. Под общ. ред. Е. А. Федосова. М.: Машиностроение, 2000. 688 с.
7. **Филлипс Ч., Харбор Р.** Системы управления с обратной связью. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. 616 с.
8. **Дорф Р., Бишоп Р.** Современные системы управления. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. 832 с.
9. **Гудвин Г. К., Гребс С. Ф., Сальгадо М. Э.** Проектирование систем управления. М.: Лаборатория Знаний, 2004. 911 с.
10. **Фрадков А. Л.** Адаптивная стабилизация минимально-фазовых объектов с векторным входом без измерения производных от выхода // Докл. РАН. 1994. Т. 337, № 5. С. 592—594.
11. **Andrievsky B. R., Fradkov A. L., Stotsky A. A.** Shunt Compensation for Indirect Sliding-Mode Adaptive Control // Proc. 13th Triennial IFAC World Congr. V. K. 1996. San-Francisco, USA. P. 193—198.
12. **Андреевский Б. Р., Фрадков А. Л.** Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. СПб.: Наука, 2000. 475 с.
13. **Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л.** Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 200. 549 с.
14. **Bar-Kana I.** Parallel Feedforward and Simplified Adaptive Control // Int. Journ. Adapt. Control and Signal Processing. 1987. Vol. 1. P. 95—109.
15. **Kaufman H., Bar-Kana I., Sobel K.** Direct Adaptive Control Algorithms. N.-Y.: Springer-Verlag, 1994.
16. **Iwai Z., Mizumoto I.** Realization of Simple Adaptive Control by Using Parallel Feedforward Compensator // Int. Journ. Control. 1994. 59 (6). P. 1543—1565.
17. **Bartolini G., Ferrara A., Stotsky A.** Stability and Exponential Stability of an Adaptive Control Scheme for Plants of any Relative Degree // IEEE Trans. Autom. Contr. 1995. Vol. 40, N 1.
18. **Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Робастная коррекция объектов регулирования // Проблемы теории и практики в инженерных исследованиях: Сб. науч. трудов. М.: Изд-во АСВ, 1998. С. 248—252.
19. **Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Согласно-параллельная коррекция объектов в задачах робастного регулирования // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации: Сб. трудов междунар. науч.-техн. семинара. М.: Изд-во МАИ, 1998. С. 131—133.
20. **Edwards C., Spurgeon S. K.** Sliding Mode Control: Theory and Applications. London: Taylor and Francis, 1998.
21. **Deng M., Iwai Z., Mizumoto I.** Robust Parallel Compensator Design for Output Feedback Stabilization of Plants with Structured Uncertainty // Systems and Control Letters 36. 1999. P. 193—198.
22. **Ohtsuka H., Nagata M., Iwai Z.** Sliding Mode Control System Design Using Parallel Feedforward Compensator // Proc. of 5th ASCC, CD-ROM. 2004. P. 1974—1982.
23. **Gessing R.** Parallel Compensator for Continuous and Relay Control Systems with Difficult Plants // American Control Conf. ACC'07. USA, New York, NY 9—13 July 2007. P. 5810—5815.
24. **Wana Y., Royb S., Saberib A.** Pre- Y Post- Y Feedforward Compensator Design for Zero Placement // International Journal of Control. 2010. Vol. 83, N 9. P. 1839—1843.
25. **Gavini L., Izadian A., Li L.** A Parallel Compensation Approach in Controls of Buck-Boost Converters // Proc. 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Melbourne, Australia, November 2011. P. 451—455.
26. **Qian C., Mingzhi H., Zheng T. Q.** Simulation and Research on Three-Phase Parallel PFC with FeedForward Compensation // Wseas Transactions on Circuits and Systems. 2011. Vol. 9, Iss. 9. P. 309—318.
27. **Landau I. D., Airimitoie T.-B., Alma M.** An IIR Youla-Kucera Parametrized Adaptive Feedforward Compensator for Active Vibration Control with Mechanical Coupling // IEEE Tran. on Control Systems Technology. 2013. 21 (3). P. 765—779.
28. **Кострикин А. И.** Введение в алгебру. М.: Наука, 1977. 496 с.
29. **Солодовников В. В., Филимонов Н. Б.** Динамическое качество автоматического регулирования. М.: МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1987. 84 с.
30. **Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Робастная коррекция в системах управления с большим коэффициентом усиления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 12. С. 3—10.
31. **Филимонов А. Б.** Спектральная декомпозиция систем с запаздываниями. Компенсация запаздываний. М.: Изд-во Физматлит, 2002. 288 с.

Concerning the Problem of a Parallel Feedforward Correction of the Regulation Systems

A. B. Filimonov¹, filimon_ab@mail.ru, **N. B. Filimonov**², nbfilimonov@mail.ru ✉,

¹Moscow State University of Information Technology, Radio Engineering and Electronics, Moscow, 116454, Russian Federation,

²Moscow State University named after Lomonosov, Institute of Control Sciences named after V. A. Trapeznikov, RAS, Moscow, 119991, Russian Federation

Corresponding author: **Filimonov Nikolay B.**, Professor, D. Sc., Moscow State University named after Lomonosov, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: nbfilimonov@mail.ru

Received on April 20, 2015

Accepted April 27, 2015

The functional purpose of the correcting links in the structure of the automatic regulation systems (ARS) is improvement of the precision and dynamic quality of the regulation processes. In the classical methods of ARS design two types of the correcting links are used: of the sequential and parallel feedback. At the same time there is one more type of correction. It has been insufficiently studied within the framework of the classical automatic regulation theory and practically ignored in the modern researches. It is a parallel feedforward correction (PFC). A logical question appears concerning the usefulness of the given type of correction for the developers of ARS. This question is exactly the subject of the given paper. Three methods of PFC application are considered: compensation of the transfer poles of the control channel, its control by the transfer zeroes, and correction of the amplitude-phase characteristics of an open loop. The method of compensation of the transfer poles of an object reduces the order of the transfer functions of the control channel, and, as a result, the dimension of the regulation problem to be solved is reduced. Its auxiliary effect is analyzed, that is formation of a non-control and non-observed subsystem in ARS

structure, the spectrum of which coincides with that of the compensated poles. "The bad" transfer zeroes of an object are problematical for a great many methods of synthesis of ARS. The right zeroes, and also the left zeroes, which are in the immediate proximity to the imaginary axis, are among them. By means of PFC it is possible to change purposefully the transfer zeroes and even to exclude them from the corrected control channel. Correction of the frequency characteristics of the direct chain of PFC is realized with a view to ensure the desired phase and amplitude stability for the closed system. The authors demonstrate good prospects of its use in the regulation tasks with big amplification factor. The conducted researches demonstrate wide functional potentials of the considered mechanism of PFC and expediency of its use alongside with the classical methods of correction. In this connection the question about development of a methodology of PFC and its inclusion in the modern engineering instrument of ARS design is quite appropriate.

Keywords: automatic regulation systems, parallel feedforward correction, compensation of transfer poles, control by transfer zeroes, correction of the amplitude-phase characteristics, infinitely high gain

Acknowledgements: This work was supported by a grant from the Russian Foundation for Basic Research, projects No. 13-08-00161a and No. 13-08-00948a.

For citation:

Filimonov A. B., Filimonov N. B. Concerning the Problem of a Parallel Feedforward Correction of the Regulation Systems, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 8, pp. 507–514.

DOI: 10.17587/mau.16.507-514

References

1. **Besekerskiy V. A., Popov E. P.** *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* (Theory of Automatic Control Systems). SPb.: Izd-vo "Professija", 2003, 752 p. (in Russian).
2. **Teoriya avtomaticheskogo upravleniya (Automatic Control Theory) / S. E. Dushin i dr.; Pod red. V. B. Jakovleva, Moscow, Vysshaya shkola, 2003, 567 p. (in Russian).**
3. **Solodovnikov V. V.** ed. *Tekhnicheskaya kibernetika. Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya. Kn. 2. Analiz i sintez lineynykh nepreryvnykh i diskretnykh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* (Technical Cybernetics. Theory of Automatic Control. Book 2. Analysis and Synthesis of Linear Continuous and Discrete Systems of Automatic Control), Moscow, Mashinostroenie, 1967, 682 p. (in Russian).
4. **Topchev Ju. I.** *Atlas dlya proektirovaniya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* (Atlas for the Design of Automatic Control Systems), Moscow, Mashinostroenie, 1989, 752 p. (in Russian).
5. **Egupov N. D.** ed. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya. Uchebnik. T. 2. Sintez regulatorov i teoriiya optimizatsii sistem avtomaticheskogo upravleniya* (Methods of Classical and Modern Theory of Automatic Control. Tutorial in 3 vol. Vol. 2. The Synthesis of Regulators and Optimization Theory of Automatic Control), Moscow, Publishing house of MGTU im. N. Je. Bauman, 2000, 736 p. (in Russian).
6. **Fedosov E. A.** ed. *Mashinostroenie. Jenciklopediya v 40 tt. T. 1–4. Avtomaticheskoe upravlenie. Teoriya* (Machinery Building. Encyclopedia in 40 vol. Vol. 1–4. Automatic Control. Theory), Moscow, Mashinostroenie, 2000, 688 p. (in Russian).
7. **Phillips C. L., Harbor R. D.** *Feedback Control Systems*, Prentice Hall, 1999, 658 p.
8. **Dorf R. C., Bishop R. H.** *Modern Control Systems*, Prentice Hall, 2007, 1056 p.
9. **Goodwin G. C., Graebe S. F., Salgado M. J.** *Control System Design*. Prentice Hall, 2001, 908 p.
10. **Fradkov A. L.** *Adaptivnaya stabilizatsiya minimal'no-fazovykh ob'ektov s vektornym vkhodom bez izmereniya proizvodnykh ot vyhoda* (The Adaptive Stabilization of Minimum-Phase Objects with Vector Input without Dimension of Derivatives from Output), *Dokl. RAN*, 1994, vol. 337, no. 5, pp. 592–594.
11. **Andrievskiy B. R., Fradkov A. L., Stotsky A. A.** Shunt Compensation for Indirect Sliding-Mode Adaptive Control, *Proc. 13th Triennial IFAC World Congr. V. K*, 1996, San-Francisco, USA, pp. 193–198.
12. **Andrievskiy B. R., Fradkov A. L.** *Izbrannye glavy teorii avtomaticheskogo upravleniya s primerami na yazyke MATLAB* (The Selected Chapters of Automatic Control Theory with Examples in MATLAB Language), SPb., Nauka, 2000, 475 p. (in Russian).
13. **Miroshnikov I. V., Nikiforov V. O., Fradkov A. L.** *Nelinejnoe i adaptivnoe upravlenie slozhnymi dinamicheskimi sistemami* (Nonlinear and Adaptive Control by Complex Dynamic Systems), SPb., Nauka, 200, 549 p. (in Russian).
14. **Bar-Kana I.** Parallel Feedforward and Simplified Adaptive Control, *Int. Journ. Adapt. Control and Signal Processing*, 1987, vol. 1, pp. 95–109.
15. **Kaufman H., Bar-Kana I., Sobel K.** *Direct Adaptive Control Algorithms*, N.-Y., Springer-Verlag, 1994.
16. **Iwai Z., Mizumoto I.** Realization of Simple Adaptive Control by Using Parallel Feedforward Compensator, *Int. Journ. Control*, 1994, 59 (6), pp. 1543–1565.
17. **Bartolini G., Ferrara A., Stotsky A.** Stability and Exponential Stability of an Adaptive Control Scheme for Plants of any Relative Degree, *IEEE Trans. Autom. Contr.*, 1995, vol. 40, no. 1.
18. **Filimonov A. B., Filimonov N. B.** *Robastnaya korrektsiya ob'ektov regulirovaniya* (Robast Correction of Regulation Objects), *Problemy Teorii i Praktiki v Inzhenerykh Issledovaniyakh*, Moscow, ASV, 1998, pp. 248–252 (in Russian).
19. **Filimonov A. B., Filimonov N. B.** *Soglasno-parallel'naya korrektsiya ob'ektov v zadachah robastnogo regulirovaniya* (Parallel Feedforward Correction of Objects in the Tasks of Robust Regulation), *Sovremennyye tekhnologii v zadachah upravleniya, avtomatiki i obrabotki informatsii. Sb. trudov mezhdunar. nauch.-tehn. seminarov*, Moscow, Publishing house of MAI, 1998, pp. 131–133. (in Russian).
20. **Edwards C., Spurgeon S. K.** *Sliding Mode Control: Theory and Applications*, London, Taylor and Francis, 1998.
21. **Deng M., Iwai Z., Mizumoto I.** Robust Parallel Compensator Design for Output Feed-back Stabilization of Plants with Structured Uncertainty, *Systems and Control Letters*, 1999, 36, pp. 193–198.
22. **Ohtsuka H., Nagata M., Iwai Z.** Sliding Mode Control System Design Using Parallel Feedforward Compensator, *Proc. of 5th ASCC, CD-ROM*, 2004, pp. 1974–1982.
23. **Gessing R.** Parallel Compensator for Continuous and Relay Control Systems with Difficult Plants, *American Control Conf. ACC'07, USA*, New York, NY 9–13 July 2007, pp. 5810–5815.
24. **Wana Y., Royb S., Saberib A.** Pre- Y Post- Y Feedforward Compensator Design for Zero Placement, *International Journal of Control*, 2010, vol. 83, no. 9, pp. 1839–1843.
25. **Gavini L., Izadian A., Li L.** A Parallel Compensation Approach in Controls of Buck-Boost Converters, *Proc. 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Melbourne, Australia, November 2011, pp. 451–455.
26. **Qian C., Mingzhi H., Zheng T. Q.** Simulation and Research on Three-Phase Parallel PFC with FeedForward Compensation, *Weas Transactions on Circuits and Systems*, 2011, vol. 9, iss. 9, pp. 309–318.
27. **Landau I. D., Airimit'oae T.-B., Alma M.** An IIR Youla-Kucera Parametrized Adaptive Feedforward Compensator for Active Vibration Control with Mechanical Coupling, *IEEE Tran. on Control Systems Technology*, 2013, 21 (3), pp. 765–779.
28. **Kostrikin A. I.** *Vvedenie v algebra* (Introduction into Algebra), Moscow, Nauka, 1977, 496 p. (in Russian).
29. **Solodovnikov V. V., Filimonov N. B.** *Dinamicheskoe kachestvo avtomaticheskogo regulirovaniya* (The Dynamic Quality of Automatic Regulation), Moscow, MVTU im. N. Je. Bauman, 1987, 84 p. (in Russian).
30. **Filimonov A. B., Filimonov N. B.** *Robastnaya korrektsiya v sistemah upravleniya s bol'shim koefitsientom usileniya* (Robust Correction in Control Systems with High Gain), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 12, pp. 3–10 (in Russian).
31. **Filimonov A. B.** *Spektral'naya dekompozitsiya sistem s zapazdyvaniyami. Kompensatsiya zapazdyvaniy* (Spectral Decomposition of Systems with Delay Time. The Compensation of Delay Time), Moscow, Fizmatlit, 2002, 288 p. (in Russian).

А.А. Кабанов, канд. техн. наук, зав. кафедрой, KabanovAleksey@gmail.com,
Севастопольский государственный университет, г. Севастополь

Приближенная линеаризация обратной связи на основе сингулярно возмущенного подхода¹

Рассматривается вопрос синтеза приближенной линеаризирующей обратной связи на основе сингулярно возмущенного представления системы. Идея разработанного метода основана на декомпозиции исходной системы и решении задач синтеза линеаризирующей обратной связи для подсистем, полученных в результате этого разделения. При этом для упрощения процесса декомпозиции предлагается сначала линеаризовать часть системы, описывающую движение быстрых переменных состояния. Показаны примеры применения разработанного метода.

Ключевые слова: сингулярно возмущенная система, приближенная линеаризация обратной связи, композиционное управление, робастная устойчивость

Введение

Линеаризация с помощью обратной связи (feedback linearization) является эффективным методом синтеза нелинейных систем управления [1–4]. Идея метода заключается в том, что посредством обратной связи исходная нелинейная система преобразовывается в линейную, записанную в канонической форме, к которой затем применяются методы теории линейных систем управления.

Применимость метода внешней линеаризации гарантируется соблюдением строгих условий управляемости и инволютивности для рассматриваемой нелинейной системы, что не всегда имеет место. В такой ситуации используют методы приближенной линеаризации обратной связью (approximate feedback linearization) [5–9]. Наиболее широкое распространение для приближенной линеаризации получил подход, основанный на разложении исходной системы в ряд Тейлора [5, 6]. Другой подход, представленный в работах [7, 8], базируется на применении динамической обратной связи и понятии d -относительной степени, где d — некоторое целое число. Здесь основная идея состоит в преобразовании уравнений динамики системы к линейной форме, к которой добавляются дополнительные члены более высокого порядка, чем заданное целое число d . Главный недостаток такого решения связан с повышением порядка системы и порядка динамической обратной связи. С учетом этого в работе [9] представлен противоположный способ приближенной линеаризации, опирающийся на представление системы в сингулярно возмущенном виде и разделении движений на быстрые и медленные.

При математическом описании сингулярно возмущенных (СВ) систем используют малые параметры, которые выступают множителем при старших производных в уравнении состояния системы [10–12]. При этом разнотемповость движений может быть обусловлена разными физическими фак-

торами, например, наличием малых масс или моментов инерции, больших коэффициентов усиления и др. Так, в работе [9] для приведения системы к сингулярно возмущенному виду применяется обратная связь с большим коэффициентом усиления.

Задаче линеаризации обратной связью нелинейных СВ систем посвящены работы [13–18]. В работах [13, 14] рассматривается задача линеаризации обратной связью так называемой медленной подсистемы, а не всей системы целиком. Этот непрямой подход основан на редукции исходной нелинейной СВ системы с последующей линеаризацией медленной подсистемы. Развитие данных результатов показано в работах [15, 16], где на основе решений задач внешней линеаризации для медленной и быстрой подсистем строится композиционное управление для исходной нелинейной СВ системы. Основное ограничение описанных выше результатов связано с классом рассматриваемых систем — СВ систем с линейным вхождением вектора быстрых переменных в уравнение системы. Это связано, в первую очередь, с выполнимостью условий теоремы Тихонова. В работах [17, 18] для систем с нелинейной зависимостью и по медленным и по быстрым переменным состояниям авторами предложен диффеоморфизм, независимый от малого сингулярно возмущающего параметра, преобразующий исходную нелинейную СВ систему к специальному линейному виду (не каноническому), при этом преобразующий диффеоморфизм также строится отдельно для быстрых и медленных движений системы. В работе [9] подобные результаты были получены для систем, которые изначально не содержат сингулярно возмущающих параметров. Здесь для приведения системы к СВ виду вводится специальное преобразование, параметры которого связаны с большим коэффициентом усиления в обратной связи для переменных состояния, которые считаются быстрыми. Таким образом, если исходная система представима в СВ виде, то декомпозицию и построение диффеоморфизмов отдельно для медленных и быстрых движений можно использовать

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-08-06859).

как средство синтеза приближенной линеаризирующей обратной связи.

В данной работе предлагается метод приближенной линеаризации обратной связью для нелинейных СВ систем, основанный на разделении исходной системы и построении линеаризирующего управления в виде композиции линеаризирующих управлений для медленных и быстрых движений. При этом основная сложность, которая возникает при разделении движений, связана с выполнимостью условий теоремы Тихонова для исходной нелинейной СВ системы, в частности, с разрешимостью нелинейного относительно быстрых переменных состояния алгебраического уравнения, которое возникает в результате пренебрежения малым параметром. Для преодоления этого в статье предлагается сначала выполнить линеаризацию с помощью обратной связи для части системы, описывающей быстрые движения. При этом быстрое управление выбирается так, чтобы условия теоремы Тихонова выполнялись. Затем, используя стандартную методику теории сингулярных возмущений, получаем систему только медленных движений, для которой далее также решается задача линеаризации обратной связью.

Статья построена следующим образом: первый раздел содержит постановку задачи управления; второй раздел содержит ряд математических определений, которые используются в статье; решение задачи синтеза приближенной линеаризирующей обратной связи показано в третьем разделе; примеры синтеза на основе разработанного метода приводятся в четвертом разделе; в заключении представлены основные выводы.

1. Постановка задачи

Рассматривается нелинейная сингулярно возмущенная система вида

$$\dot{x}(t) = F(x, z, u), x(0) = x^0, y = \varphi(x), \quad (1)$$

$$\varepsilon \dot{z}(t) = f(x, z) + g(x, z)u, z(0) = z^0, \quad (2)$$

где $x \in R^{n_1}$, $z \in R^{n_2}$ — переменные состояния; $y, u \in R^1$ — выход и управление соответственно; F, f и g — равномерно непрерывные и ограниченные гладкие векторные функции с достаточным числом производных по всем аргументам; $\varepsilon > 0$ — малый параметр (сингулярное возмущение).

Требуется найти управление u и преобразование $T(x, z)$, не зависящие от параметра ε и такие, что при достаточно малом ε система (1), (2) может быть приближенно (с точностью до $O(\varepsilon)$) преобразована к линейному виду относительно скалярного выхода $y = \varphi(x)$.

2. Предварительные сведения

Приведем основные определения, которые будут использоваться далее [9]. Пусть $\varphi(x, z): D_x \times D_z \rightarrow R$ —

гладкая функция и $f(x, z)$ — гладкое векторное поле на множестве $D_x \times D_z \rightarrow R^n$. Скалярная функция, определенная как

$$L_f \varphi(x, z) = \frac{\partial \varphi}{\partial x} f(x, z),$$

называется производной Ли от скалярной функции вдоль векторного поля f .

Пусть $f(x, z)$ и $g(x, z)$ — гладкие векторные поля на множестве $D_x \times D_z \rightarrow R^n$. Векторное поле вида

$$[f(x, z), g(x, z)] = \text{ad}_f g(x, z) = \frac{\partial g}{\partial x} f(x, z) - \frac{\partial f}{\partial x} g(x, z),$$

называется производной Ли от вектора g вдоль векторного поля f или скобкой Ли.

Также используются обозначения для производной Ли порядка k :

$$L_f^0 \varphi(x, z) = \varphi(x, z), \text{ad}_f^0 g(x, z) = g(x, z),$$

$$L_g L_f = L_g(L_f), L_f^k = L_f(L_f^{k-1}), \text{ad}_f^k = \text{ad}_f(\text{ad}_f^{k-1}), \\ k = 2, 3, \dots$$

3. Приближенная линеаризация обратной связью

Пусть система (1), (2) удовлетворяет следующему условию:

У1. Существует функция $T_{f1}(x, z)$ такая, что для всех (x, z) справедливы соотношения

$$L_g L_f^{i-1} T_{f1}(x, z) = 0, i = \overline{1, n_2 - 1};$$

$$L_g L_f^{n_2 - 1} T_{f1}(x, z) \neq 0.$$

Лемма 1. При выполнении условия У1 существует диффеоморфизм

$$\begin{pmatrix} \xi_1 \\ \vdots \\ \xi_{n_2} \end{pmatrix} = \xi = T_f(x, z) = \begin{pmatrix} T_{f1}(x, z) \\ \vdots \\ L_f^{n_2 - 1} T_{f1}(x, z) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

который преобразует соотношение (2) к виду

$$\varepsilon \dot{\xi}(t) = A_{fc} \xi + B_{fc} a_f(x, z)(u - b_f(x, z)) + \\ + \varepsilon \frac{\partial T_f(x, z)}{\partial x} F(x, z, u), \quad (4)$$

где (A_{fc}, B_{fc}) — каноническая пара в форме Бруновского и

$$a_f(x, z) = L_g L_f^{n_2 - 1} T_{f1}(x, z),$$

$$b_f(x, z) = \frac{-L_f^{n_2} T_{f1}(x, z)}{a_f(x, z)}.$$

Доказательство. Используя соотношение (3), вычислим производную $\dot{\xi}$:

$$\dot{\xi}(t) = \frac{\partial T_f(x, z)}{\partial x} \dot{x} + \frac{\partial T_f(x, z)}{\partial z} \dot{z} = \varepsilon^{-1} \frac{\partial T_f(x, z)}{\partial z} f(x, z) + \varepsilon^{-1} \frac{\partial T_f(x, z)}{\partial z} g(x, z) u + \frac{\partial T_f(x, z)}{\partial x} F(x, z, u).$$

Следуя определению производной Ли (см. раздел 2), перепишем $\frac{\partial T_f(x, z)}{\partial z} f(x, z)$ в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_f(x, z)}{\partial z} f(x, z) &= \begin{pmatrix} \frac{\partial T_{f1}(x, z)}{\partial z} f(x, z) \\ \vdots \\ \frac{\partial L_f^{n_2-2} T_{f1}(x, z)}{\partial z} f(x, z) \\ \frac{\partial L_f^{n_2-1} T_{f1}(x, z)}{\partial z} f(x, z) \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} L_f T_{f1}(x, z) \\ \vdots \\ L_f^{n_2-1} T_{f1}(x, z) \\ L_f^{n_2} T_{f1}(x, z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \xi_2 \\ \vdots \\ \xi_{n_2} \\ L_f^{n_2} T_{f1}(x, z) \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Аналогичным образом получаем соотношение для $\frac{\partial T_f(x, z)}{\partial z} g(x, z)$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_f(x, z)}{\partial z} g(x, z) &= \\ &= \begin{pmatrix} L_g T_{f1}(x, z) \\ \vdots \\ L_g L_f^{n_2-2} T_{f1}(x, z) \\ L_g L_f^{n_2-1} T_{f1}(x, z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ L_g L_f^{n_2-1} T_{f1}(x, z) \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Последние выкладки показывают, что (2) приводится к виду (4).

Теперь покажем, что отображение $T_f(x, z)$ является диффеоморфизмом. Для этого найдем матрицу Якоби системы

$$J(x, z) = \begin{pmatrix} \frac{\partial T_f(x, z)}{\partial x} & \frac{\partial T_f(x, z)}{\partial z} \end{pmatrix}.$$

Если матрица Якоби $J(x, z)$ отображения $T_f(x, z)$ имеет максимальный возможный ранг, то это ото-

бражение будет невырожденным [1], т. е. $T_f(x, z)$ является невырожденным преобразованием, если

$$\text{rank} J(x, z) = \min(n_2, n) = n_2, \quad (5)$$

что имеет место при невырожденности $\frac{\partial T_f(x, z)}{\partial z}$.

По аналогии с работой [19] покажем, что для всех $(x, z) \in D_x \times D_z$ и для всех целых $k \geq 0$ и $j: 0 \leq j \leq n_2 - k - 1$ справедливо

$$\begin{aligned} L_{ad_f^j} L_f^k T_{f1}(x, z) &= \\ &= \begin{cases} 0, & 0 \leq j + k < n_2 - 1; \\ L_g L_f^{n_2-1} T_{f1}(x, z) \neq 0, & j + k = n_2 - 1. \end{cases} \quad (6) \end{aligned}$$

Используя тождество Якоби, перепишем левую часть из (6)

$$\begin{aligned} L_{ad_f^j} L_f^k T_{f1}(x, z) &= \\ &= L_f L_{ad_f^{j-1}} L_f^k T_{f1}(x, z) - L_{ad_f^{j-1}} L_f^{k+1} T_{f1}(x, z). \quad (7) \end{aligned}$$

При $j = 0$ согласно условию У1 из соотношения (7) получаем

$$L_{ad_f^0} L_f^k T_{f1}(x, z) = L_g L_f^k T_{f1}(x, z) = 0, \quad 0 \leq k < n_2 - 1.$$

При $j = 1$ согласно условию У1 из соотношения (7) получаем

$$\begin{aligned} L_{ad_f^1} L_f^k T_{f1}(x, z) &= L_f L_g L_f^k T_{f1}(x, z) - \\ &- L_g L_f^{k+1} T_{f1}(x, z) = 0, \quad 0 \leq 1 + k < n_2 - 1. \end{aligned}$$

Рассчитаем (7) для некоторого j . Сначала заметим, что условие У1 эквивалентно требованию [4]

$$L_g L_f^{i-1} T_{f1}(x, z) = L_{ad_f^{i-1}} T_{f1}(x, z) = 0, \quad i = \overline{1, n_2 - 1};$$

$$L_g L_f^{n_2-1} T_{f1}(x, z) = L_{ad_f^{n_2-1}} T_{f1}(x, z) \neq 0.$$

Следовательно, для первого слагаемого в соотношении (7) справедливо

$$\begin{aligned} L_f L_{ad_f^{j-1}} L_f^k T_{f1}(x, z) &= L_f L_g L_f^{k+j-1} T_{f1}(x, z) = 0, \\ &0 \leq j + k - 1 < n_2 - 1. \end{aligned}$$

Для второго слагаемого получаем

$$\begin{aligned} L_{ad_f^{j-1}} L_f^{k+1} T_{f1}(x, z) &= \\ &= \begin{cases} 0, & 0 \leq j + k < n_2 - 1; \\ L_g L_f^{j+k} T_{f1}(x, z) \neq 0, & j + k = n_2 - 1. \end{cases} \end{aligned}$$

Поскольку равенство (6) справедливо для $j = 0$, $j = 1$, для некоторого j , то согласно математической индукции верно и следующее утверждение с номером $j + 1$.

Для доказательства невырожденности $\frac{\partial T_f(x, z)}{\partial z}$ рассмотрим матричное уравнение

$$\frac{\partial T_f(x, z)}{\partial z} [g(x, z) \dots a d_f^{n_2-1} g(x, z)] =$$

$$= \begin{bmatrix} L_g T_{f1}(x, z) & L_{a d_f g} T_{f1}(x, z) & \dots & \dots & L_{a d_f^{n_2-1} g} T_{f1}(x, z) \\ L_g L_f T_{f1}(x, z) & \dots & \dots & L_{a d_f^{n_2-2} g} T_{f1}(x, z) & * \\ \vdots & & & & \vdots \\ L_g L_f^{n_2-1} T_{f1}(x, z) & * & \dots & \dots & * \end{bmatrix}.$$

С учетом равенства (6) данная матрица принимает вид

$$\frac{\partial T_f(x, z)}{\partial z} [g(x, z) \dots a d_f^{n_2-1} g(x, z)] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & \dots & \Delta \\ 0 & \vdots & \dots & \Delta & * \\ \vdots & \Delta & & \vdots & \\ \Delta & * & \dots & \dots & * \end{bmatrix},$$

где Δ — ненулевой элемент, $*$ — некоторый произвольный элемент. Поскольку данная матрица является невырожденной, то $\frac{\partial T_f(x, z)}{\partial z}$ также невырожденная и имеет полный ранг. Таким образом, доказано, что отображение $T_f(x, z)$ является диффеоморфизмом. **Лемма доказана.**

Поскольку $T_f(x, z)$ является диффеоморфизмом, то существует обратное преобразование $T_f^{-1}(x, \xi)$, такое что $z = T_f^{-1}(x, \xi)$.

Применяя преобразование (3) и с учетом того, что $z = T_f^{-1}(x, \xi)$, перепишем систему (1), (2):

$$\dot{x}(t) = F(x, z, u)|_{z=T_f^{-1}(x, \xi)}, \quad x(0) = x^0,$$

$$\varepsilon \dot{\xi}(t) = A_{fc} \xi + B_{fc} a_f(x, z)(u - b_f(x, z)) + \varepsilon \frac{\partial T_f(x, z)}{\partial x} F(x, z, u). \quad (8)$$

Следуя стандартной методике линеаризации обратной связью, выберем управление $u(x, z)$ в следующей форме:

$$u(x, z) = b_f(x, z) + a_f^{-1}(x, z)(G_f \xi - G_{f1} u_s(x)), \quad (9)$$

где матрица обратной связи $G_f = (G_{f1} \dots G_{fn_2})$ выбирается так, чтобы матрица $(A_{fc} + B_{fc} G_f)$ была Гурвицевой, $u_s(x)$ — сигнал управления для медленной системы (будет определен ниже).

Подставляя соотношение (9) в систему (8), получаем (с учетом $z = T_f^{-1}(x, \xi)$)

$$\dot{x}(t) = F(x, \xi, u_s), \quad x(0) = x^0,$$

$$\varepsilon \dot{\xi}(t) = (A_{fc} + B_{fc} G_f) \xi - B_{fc} G_{f1} u_s(x) + \varepsilon \frac{\partial T_f(x, z)}{\partial x} F(x, z, u). \quad (10)$$

Главное преимущество нелинейной СВ системы (10) над исходной системой (1), (2) заключается в том, что для системы (10) выполняются условия теоремы Тихонова, и, следовательно, движение медленных переменных x можно с точностью до $O(\varepsilon)$ описать вырожденной (медленной) системой, которая получается из исходной при $\varepsilon = 0$:

$$\bar{\xi} = (G_{f1} u_s(x) \ 0 \ \dots \ 0),$$

$$\dot{x}_s(t) = F_s(x_s, u_s) = F(x_s, \bar{\xi}, u_s), \quad x_s(0) = x^0.$$

3.1. Линеаризация обратной связью медленной подсистемы. Рассматриваем систему для медленных переменных

$$\dot{x}_s(t) = F_s(x_s, u_s), \quad x_s(0) = x^0. \quad (11)$$

Введем в рассмотрение некоторую скалярную функцию $\varphi(x_s)$. Запишем производную Ли этой функции вдоль векторного поля $F_s(x_s, u_s)$:

$$L_{F_s} \varphi(x_s, u_s) = \frac{\partial \varphi(x_s)}{\partial x_s} F_s(x_s, u_s).$$

Для производных Ли более высоких порядков имеем

$$L_{F_s}^k \varphi(x_s, u_s) =$$

$$= \frac{\partial L_{F_s}^{k-1} \varphi(x_s, u_s)}{\partial x_s} F_s(x_s, u_s), \quad L_{F_s}^0 \varphi(x_s, u_s) = \varphi(x_s).$$

У2. Пусть система (11) имеет относительную степень $r = n_1$ в точке (x^0, u_s^0) , что эквивалентно условиям [4]

$$\frac{\partial}{\partial u_s} L_{F_s}^k \varphi(x_s, u_s) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial u_s} L_{F_s}^r \varphi(x^0, u_s^0) \neq 0$$

для всех x_s в окрестности x^0 , u_s в окрестности u_s^0 и всех $k < r$.

В силу условия У2 первые r производных Ли функции $\varphi(x_s)$ не зависят от управления явным образом:

$$L_{F_s}^k \varphi(x_s, u_s) = L_{F_s}^k \varphi(x_s), \quad 0 \leq k \leq r - 1.$$

В условиях сделанных предположений существует диффеоморфизм [4]

$$T_s(x_s) = \{T_s^k(x_s)\}, k = 1, 2, \dots, r,$$

элементы которого имеют вид $T_s^k(x_s) = L_{F_s}^{k-1} \varphi(x_s)$, $1 \leq k \leq n_1$.

Определим вектор η , элементы которого выражаются через преобразование

$$\eta_1 = T_s^1(x_s) = L_{F_s}^0 \varphi(x_s) = \varphi(x_s),$$

$$\eta_k = \dot{\eta}_{k-1} = T_s^k(x_s) = L_{F_s}^{k-1} \varphi(x_s), 2 \leq k \leq n_1.$$

Дифференцируя по t переменную η_{n_1} , получим

$$\dot{\eta}_{n_1} = \vartheta(\eta, u_s) = L_{F_s}^{n_1} \varphi(T_s^{-1}(\eta), u_s).$$

Линеаризирующий закон управления для системы (11) определяется через решение относительно u_s нелинейного уравнения

$$\vartheta(\eta, u_s) = v_s. \quad (12)$$

У3. Пусть уравнение (12) имеет аналитическое решение

$$u_s = \psi(\eta, v_s). \quad (13)$$

В силу условия У3 диффеоморфизм $T_s(x_s)$ и управление $u_s = \psi(\eta, v_s)$ преобразуют систему (11) к линейному каноническому виду

$$\dot{\eta} = A_{cs}\eta + B_{cs}v_s,$$

где (A_{cs}, B_{cs}) — каноническая пара в форме Бруновского; v_s — внешний сигнал управления, который выберем в форме обратной связи

$$v_s = G_s \eta,$$

где коэффициенты матрицы G_s выбираются исходя из требования

$$\operatorname{Re} \lambda(A_{cs} + B_{cs}G_s) < 0.$$

С учетом соотношений (9) и (13) получаем окончательный вид линеаризирующего управления

$$u(x, z) = b_f(x, z) + a_f^{-1}(x, z)(G_f \xi - G_{f1} \psi(\eta, v_s))|_{\eta = T_s(x), \xi = T_f(x, z)}. \quad (14)$$

Теорема 1. При выполнении условий У1, У2 и У3 существует $\varepsilon^* > 0$, такое что $\forall \varepsilon \in (0, \varepsilon^*)$ система (1), (2) с управлением (14) является устойчивой.

Доказательство. При выполнении условия У1 справедлива лемма 1, согласно которой существует диффеоморфизм (3), преобразующий систему (1), (2)

к виду (8). Применение к системе (8) управления (14) приводит к нелинейной СВ системе

$$\dot{x}(t) = F(x, z, v_s)|_{z = T_f^{-1}(x, \xi)}, x(0) = x^0, \quad (15)$$

$$\varepsilon \dot{\xi}(t) = (A_{fc} + B_{fc}G_f)\xi - B_{fc}G_{f1}\psi(\eta, v_s) + O(\varepsilon).$$

Поскольку быстрая и медленная подсистемы, соответствующие системе (15), устойчивы (это следует из процедуры построения регулятора), то согласно теореме Климушева—Красовского существует $\varepsilon^* > 0$, такое что $\forall \varepsilon \in (0, \varepsilon^*)$ система (15) является устойчивой [10]. Поскольку диффеоморфизм $T_f(x, z)$ сохраняет устойчивость, то исходная система (1) и (2) также будет устойчивой $\forall \varepsilon \in (0, \varepsilon^*)$. **Теорема доказана.**

Замечание 1 [15]. Отдельный класс систем, для которого вычисление быстрого управления не зависит от медленного, получается в случае, когда правая часть уравнения (2) линейно зависит от z :

$$f(x, z) + g(x, z)u = f_1(x) + f_2(x)z + g(x)u.$$

В этом случае быстрая подсистема будет иметь вид [10]

$$\dot{z}_f(\tau) = f_{22}(x)z_f + g(x)u_f.$$

Поскольку система (16) является линейной по быстрой переменной z_f и управлению u_f , то внешняя линеаризация не требуется. Стабилизирующее управление u_f выбирается в форме обратной связи

$$u_f = -G_f(x)z_f = -G_f(x)(z + f_{22}(x)^{-1}(f_{21}(x) + g_2(x)u_s)),$$

где $G_f(x)$ рассчитывается так, чтобы

$$\operatorname{Re} \lambda(f_{22}(x) - g_2(x)G_f(x)) < 0, \forall x \in D.$$

Результирующее композиционное управление определяется путем суммирования быстрого и медленного управлений:

$$u = (1 - G_f(x)f_{22}(x)^{-1}g_2(x))u_s - G_f(x)(z + f_{22}(x)^{-1}f_{21}(x)). \quad (16)$$

Замечание 2. Композиционное управление (14) (или (16)) не зависит от малого параметра ε . Параметр ε может рассматриваться в роли неопределенности в системе [20], и в этом смысле система (1) с регулятором (14) (или (16)) будет обладать робастными свойствами при условии устойчивости медленной и быстрой подсистем, чего можно достичь соответствующим выбором u_f и u_s .

При соответствующем выборе коэффициентов регулятора можно добиться полной робастной устойчивости к параметру сингулярных возмущений ($\varepsilon^* = \infty$) [21], что можно использовать при синтезе управления для невозмущенных систем путем фиктивного введения параметра возмущений ε . Кроме того, для случая систем с $\varepsilon > 1$ (или с фиктивным параметром) построение асимптотики композиционного регулятора можно реализовать на основе Паде-аппроксимации, которая позволяет получить асимптотические приближения как при больших, так и при малых значениях параметра возмущений [22].

4. Примеры применения разработанного метода

Пример 1 [18]. Рассматриваем систему:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_1^2 + x_2 + z_2; \\ \dot{x}_2 &= \sin(x_1) + z_1 + x_2 z_2^2 + u; \\ \varepsilon \dot{z}_1 &= (1 + 0,5 \sin x_1)(-x_1 + z_2); \\ \varepsilon \dot{z}_2 &= x_2^2 + z_2^2 + u.\end{aligned}\quad (17)$$

Быстрая подсистема имеет вид

$$\begin{aligned}\varepsilon \dot{z}_1 &= (1 + 0,5 \sin x_1)(-x_1 + z_2), \\ \varepsilon \dot{z}_2 &= x_2^2 + z_2^2 + u.\end{aligned}$$

Выбирая $T_{f1}(x, z) = z_1$, получаем быстрый диффеоморфизм из (3)

$$T_f(x, z) = \begin{pmatrix} z_1 \\ (1 + 0,5 \sin x_1)(-x_1 + z_2) \end{pmatrix} \quad (18)$$

и соответствующее управление из (9)

$$\begin{aligned}u(x, z) &= -x_2^2 - z_2^2 + \\ &+ (1 + 0,5 \sin x_1)^{-1}(G_f \xi - G_{f1} u_s(x)).\end{aligned}\quad (19)$$

Применяя диффеоморфизм (18) и управление (19) к системе (17), устремляя $\varepsilon \rightarrow 0$, получим медленную подсистему

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_1^2 + x_2 + 2x_1; \\ \dot{x}_2 &= \sin x_1 + x_2 x_1^2 - x_2^2 - x_1^2 + u_s.\end{aligned}\quad (20)$$

Решая задачу линеаризации обратной связью для медленной подсистемы (20), определяем медленное управление

$$\begin{aligned}u_s &= x_2^2 - x_1^2 x_2 - \sin x_1 - x_2 - x_1 - \\ &- 2x_1^2 - 2x_1(x_1^2 + x_2) + v_s); \\ v_s &= G_{s1} \eta_1 + G_{s2} \eta_2; \\ \eta_1 &= x_1, \eta_2 = x_1^2 + x_1 + x_2.\end{aligned}\quad (21)$$

Искомое композиционное управление получаем подстановкой (21) в соотношение (19).

Результаты моделирования системы (17) с регулятором (21), (19) при $G_{f1} = -1$, $G_{f2} = -2$ и $G_{s1} = -10$, $G_{s2} = -4$ и разных значениях параметра возмущений ($\varepsilon = 0,01$, $\varepsilon = 100$) показаны на рис. 1. Из результатов видно, что система хорошо отрабатывает задающий сигнал, при этом является робастно устойчивой по отношению к параметру ε .

Пример 2. Рассматриваем систему

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_3 - x_2; \\ \dot{x}_2 &= -x_2 - u; \\ \dot{x}_3 &= x_1^2 - x_3 + u\end{aligned}\quad (22)$$

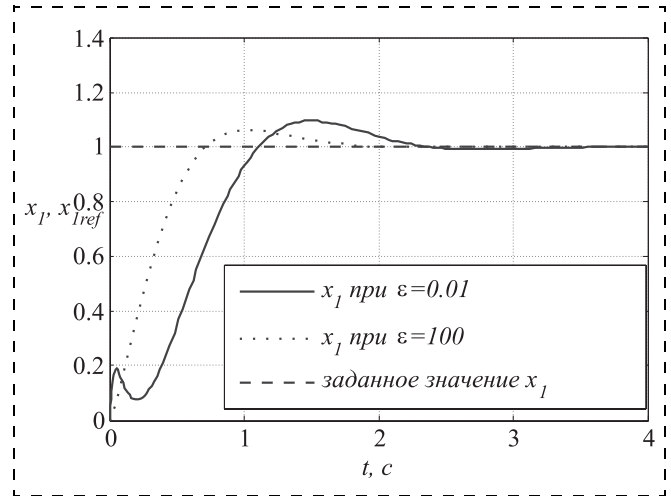


Рис. 1. Изменения координаты x_1 системы (17) при разных значениях параметра ε

с выходом $h(x) = x_1$. Система (22) имеет относительную степень 2, следовательно, ее нельзя полностью линеаризовать.

Применим разработанный метод. Введем в систему (22) параметр ε фиктивно, считая, что x_1 является медленной переменной, а x_2 и x_3 — быстрые переменные. Устремляя $\varepsilon \rightarrow 0$, получим медленную подсистему

$$\dot{x}_s = x_s^2 + 2u_s, \quad (23)$$

и быструю подсистему

$$\begin{aligned}\dot{x}_{f2} &= -x_{f2} - u_f; \\ \dot{x}_{f3} &= -x_{f3} + u_f.\end{aligned}\quad (24)$$

Решая задачи синтеза линеаризирующей обратной связи для медленной системы (23), получаем $u_s = -0,5x_1^2 + v_s$.

Внешнее управление v_s удобно реализовать в виде пропорционального регулятора по ошибке слежения, т. е. $v_s = k_p e$, $e = x_{1ref} - x_1$.

Быстрое управление u_f для системы (24) выбираем в форме обратной связи:

$$u_f = (G_{f3} - G_{f2})u_s - G_{f2}x_2 - G_{f3}(x_3 - x_1^2),$$

где G_{f2} , G_{f3} — коэффициенты обратной связи.

Результирующее композиционное управление согласно (16) будет равно

$$\begin{aligned}u &= (1 - G_{f2} + G_{f3})(-0,5x_1^2 + v_s) - \\ &- G_{f2}x_2 - G_{f3}(x_3 - x_1^2).\end{aligned}\quad (25)$$

Результаты моделирования системы (22) с регулятором (25) при $G_{f2} = -10^4$, $G_{f3} = 10^4$, $k_p = 10$ и $\varepsilon = 1$ показаны на рис. 2. Задающий сигнал взят в форме прямоугольных импульсов с амплитудой 2 и частотой 1 Гц. На рис. 2 также показан переходный процесс для переменной x_1 при $\varepsilon = 500$ (пунктир-

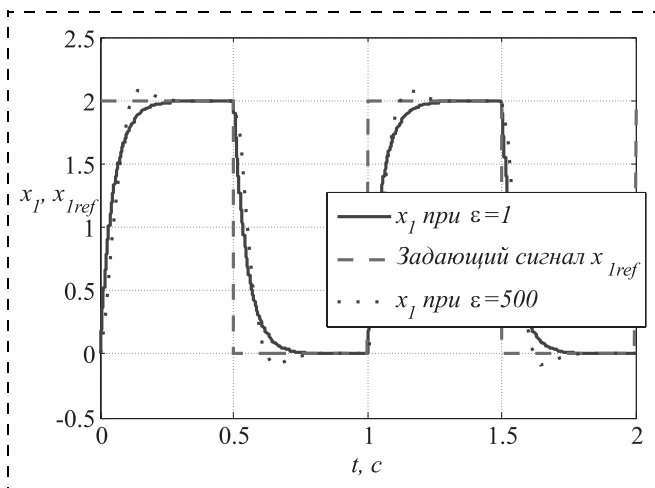


Рис. 2. Изменения координаты x_1 системы при разных значениях параметра ε

ная линия). Из результатов видно, что система хорошо отрабатывает задающий сигнал, при этом является робастной по отношению к параметру ε , который был введен фиктивно.

Заключение

В настоящей работе для класса нелинейных сингулярно возмущенных систем разработан метод синтеза приближенной линейаризирующей обратной связи. Преимущество данного метода заключается в упрощении исходной задачи линейаризации обратной связью путем ее декомпозиции на две подзадачи: отдельно для медленной подсистемы и отдельно для быстрой. При этом для обеспечения условий декомпозиции системы с помощью стандартной техники теории сингулярных возмущений сначала выполняется линейаризация обратной связью быстрой подсистемы. Это позволяет достичь соблюдения условий теоремы Тихонова и выразить медленную подсистему, для которой затем также решается задача линейаризации. Результирующее управление определяется в виде композиции управлений для медленной и быстрой подсистем. Полученное таким образом композиционное управление не зависит от параметра сингулярных возмущений и наделяет систему робастными свойствами относительно этого параметра. Данный факт позволяет использовать разработанный метод для синтеза не возмущенных систем. В такой ситуации параметр возмущений вводится фиктивно для реализации процедуры декомпозиции, при этом одной из целей последующего синтеза является достижение робастной устойчивости системы для больших значений параметра возмущений ($\varepsilon > 1$).

Предложенный в статье подход эффективен и в случаях, когда исходная нелинейная система целиком нелинейаризируема с помощью обратной связи. Разделение системы, решение укороченных (редуцированных) подзадач и асимптотическая композиция этих решений выступают естественным спо-

собом упрощения исходной полной задачи синтеза на основе внешней линейаризации.

Эффективность разработанного метода как для сингулярно возмущенных систем, так и для не возмущенных систем показана на примерах. В обоих случаях у синтезированной замкнутой системы наблюдаются робастные свойства по отношению к параметру возмущений.

Список литературы

1. Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000. 549 с.
2. Sastry S. Nonlinear systems: analysis, stability, and control. New York: Springer-Verlag, 2010.
3. Isidori A. Nonlinear control systems. New York: Springer-Verlag, 1995.
4. Henson M. A., Seborg D. E. Nonlinear process control. New Jersey: Prentice hall, 1997. 432 p.
5. Guardabassi G. O., Savaresi S. M. Approximate linearization via feedback: an overview // Automatica. 2001. Vol. 37. P. 1—15.
6. Krener A. J. Approximate linearization by state feedback and coordinate change // System & Control Letters. 1984. N 5. P. 181—185.
7. Kang W., Krener A. J. Extended quadratic controller normal form and dynamic state feedback linearization of nonlinear systems // SIAM Journal on Control and Optimization. 1992. N. 30. P. 1319—1337.
8. Kang W. Approximate linearization of nonlinear control systems // W. Kang // Systems & Control Letters. 1994. Vol. 23. P. 43—52.
9. Son J.-W., Lim J.-T. Stabilization of Approximately Feed-back Linearizable Systems Using Singular Perturbation // IEEE Trans. on Automatic Control. 2008. Vol. 53, N 6. P. 1499—1503.
10. Kokotovic P. V., Khalil H. K., O'Reilly J. Singular perturbation methods in control: analysis and design. Orlando: Academic Press, 1986. 371 p.
11. Naidu D. S. Singular Perturbation Methodology in Control Systems. L.: P. Peregrinus on behalf of the Institution of Electrical Engineers, 1988. 304 p.
12. Дмитриев М. Г., Курина Г. А. Сингулярные возмущения в задачах управления // Автоматика и телемеханика. 2006. № 1. С. 3—51.
13. Khorasani K. On Linearization of Nonlinear Singularly Perturbed Systems // IEEE Trans. on Automatic Control. 1987. Vol. 32, N 3. P. 256—260.
14. Khorasani K. A Slow Manifold Approach to Linear Equivalents of Nonlinear Singularly Perturbed Systems // Automatica. 1989. Vol. 25, N 2. P. 301—306.
15. Кабанов А. А. Композиционный синтез нелинейных сингулярно возмущенных систем на основе метода линейаризации обратной связью // Тр. X Междунар. конф. "Идентификация систем и задачи управления" SICPRO'15. Москва, 26—29 января 2015 г. М.: Изд. ИПУ РАН, 2015. С. 548—556.
16. Кабанов А. А. Управление нелинейными сингулярно возмущенными системами на основе метода линейаризации обратной связью // Матер. 4-го науч.-техн. семинара "Современные проблемы прикладной математики, информатики, автоматизации и управления", 23—27 сентября 2014 г., г. Севастополь. М.: Изд-во ИПИ РАН, 2014. С. 62—69.
17. Choi H.-L., Shin Y.-S., Lim J.-T. Control of nonlinear singularly perturbed systems using feedback linearization // IEE Proc.-Control Theory Appl. 2005. Vol. 152, N 1. P. 91—94.
18. Son J.-W., Lim J.-T. Feedback linearization of nonlinear singularly perturbed systems with non-separate slow-fast dynamics // IET Control Theory Appl. 2008. Vol. 2, N 8. P. 728—735.
19. Khalil H. K. Nonlinear systems. New Jersey: Prentice Hall, 2002. 750 p.
20. Дубовик С. А., Кабанов А. А. Мера устойчивости к сингулярным возмущениям и робастные свойства линейных систем // Проблемы управления и информатики. 2010. Вып. 3. С. 17—28.
21. Кабанов А. А. Синтез робастных систем стабилизации на основе теории сингулярных возмущений // Оптимизация производ. процессов: сб. науч. тр. Севастополь: изд-во СевНТУ, 2013. Вып. 14. С. 73—79.

Approximate Feedback Linearization Based on the Singular Perturbations Approach

A. A. Kabanov, KabanovAleksey@gmail.com ✉,
Sevastopol State University, Sevastopol, 299053, Russian Federation

Corresponding author: Kabanov Aleksey A., Ph. D.,
Head of Department of Informatics and Control in Technical Systems,
Sevastopol State University, 33, Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russian Federation,
e-mail: KabanovAleksey@gmail.com

Received on February 20, 2015

Accepted March 06, 2015

One of the most common methods of synthesis of the nonlinear control systems is the method of a feedback linearization (FL). The idea of this method consists in conversion of the original nonlinear system into a linear one by means of a state feedback and coordinate transformation. Then, the methods of control theory for the linear systems are used for the system design. If the original nonlinear system cannot be linearized exactly by the state feedback, the method of the approximate feedback linearization (AFL) is used. The essence of AFL method lies in the feedback linearization only of a certain part of the original nonlinear system (not of the entire system). In this paper, the author proposes a method of an approximate feedback linearization control of the nonlinear singularly perturbed (SP) systems. The proposed method is based on a decomposition of the original SP system and construction of AFL control in the form of composite FL controls for the slow and fast subsystems. In general, a nonlinear SP system cannot be easily separated into slow and fast subsystems, because the conditions of Tikhonov theorem are not complied. In order to overcome this, the author proposes to perform the feedback linearization method at first for the system's part, which describes the fast state variables. Thus, a fast control is chosen, so that the conditions of Tikhonov theorem would be met. Then, using a standard singular perturbation technique, we obtain a slow subsystem. Further the problem of FL control for a slow subsystem is solved. The resulting AFL control is obtained in the form of a composite control. Application of the proposed approach is illustrated with two examples.

Keywords: singularly perturbed system, approximate feedback linearization, composite control, robust stability

Acknowledgements: This work was supported by a grant from the Russian Foundation for Basic Research, project No. 15-08-06859.

For citation:

Kabanov A. A. Approximate Feedback Linearization Based on the Singular Perturbations Approach, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 8, pp. 515–522.

DOI: 10.17587/mau.16.515-522

References

1. Miroshnik I. V., Nikiforov V. O., Fradkov A. L. *Nelineinoe i adaptivnoe upravlenie slozhnymi dinamicheskimi sistemami* (Nonlinear and Adaptive Control of Complex Systems), St. Petersburg, Nauka, 2000, 549 p. (in Russian).
2. Sastry S. Nonlinear systems: analysis, stability, and control, New York, Springer-Verlag, 2010, 667 p.
3. Isidori A. Nonlinear control systems, London, Springer-Verlag, 1995, 293 p.
4. Henson M. A., Seborg D. E. Nonlinear process control, New Jersey, Prentice hall, 1997, 432 p.
5. Guardabassi G. O., Savaresi S. M. Approximate linearization via feedback: an overview, *Automatica*, 2001, vol. 37, pp. 1–15.
6. Krener A. J. Approximate linearization by state feedback and coordinate change, *System & Control Letters*, 1984, no. 5, pp. 181–185.
7. Kang W., Krener A. J. Extended quadratic controller normal form and dynamic state feedback linearization of nonlinear systems, *SIAM Journal on Control and Optimization*, 1992, no. 30, pp. 1319–1337.
8. Kang W. Approximate linearization of nonlinear control systems, *Systems & Control Letters*, 1994, vol. 23, pp. 43–52.
9. Son J.-W., Lim J.-T. Stabilization of Approximately Feedback Linearizable Systems Using Singular Perturbation, *IEEE Trans. on Automatic Control*, 2008, vol. 53, no. 6, pp. 1499–1503.
10. Kokotovic P. V., Khalil H. K., O'Reilly J. *Singular perturbation methods in control: analysis and design*, Orlando, Academic Press, 1986, 371 p.
11. Naidu D. S. *Singular Perturbation Methodology in Control Systems*, London, P. Peregrinus on behalf of the Institution of Electrical Engineers, 1988, 304 p.
12. Dmitriev M. G., Kurina G. A. Singular perturbations in control problems, *Automation and Remote Control*, vol. 67 (1), 2006, pp. 1–43.
13. Khorasani K. On Linearization of Nonlinear Singularly Perturbed Systems, *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1987, vol. 32, no. 3, pp. 256–260.
14. Khorasani K. A Slow Manifold Approach to Linear Equivalents of Nonlinear Singularly Perturbed Systems, *Automatica*, 1989, vol. 25, no. 2, pp. 301–306.
15. Kabanov A. A. *Kompozitsionnyi sintez nelineinykh singulyarno vozmushchennykh sistem na osnove metoda linearizatsii obratnoi svyaz'yu* (Compositional synthesis of nonlinear singularly perturbed systems based on feedback linearization method), *Trudy X Mezhdunarodnoi konferentsii "Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya" SICPRO'15*, Moscow, 2015, pp. 548–556 (in Russian).
16. Kabanov A. A. *Upravlenie nelineinymi singulyarno vozmushchennymi sistemami na osnove metoda linearizatsii obratnoi svyaz'yu* (Management of nonlinear singularly perturbed system based on feedback linearization method), *Materialy 4-go nauchno-tekhnicheskogo seminara "Sovremennye problemy prikladnoi matematiki, informatiki, avtomatizatsii i upravleniya"*, Sevastopol, 2014, pp. 62–69 (in Russian).
17. Choi H.-L., Shin Y.-S., Lim J.-T. Control of nonlinear singularly perturbed systems using feedback linearization, *IEE Proc. - Control Theory Appl.*, 2005, vol. 152, no. 1, pp. 91–94.
18. Son J.-W., Lim J.-T. Feedback linearization of nonlinear singularly perturbed systems with non-separate slow-fast dynamics, *IET Control Theory Appl.* 2008, vol. 2, no. 8, pp. 728–35.
19. Khalil H. K. *Nonlinear systems*, 3rd ed., New Jersey, Prentice Hall, 2002, 750 p.
20. Dubovik S. A., Kabanov A. A. A Measure of Stability Against Singular Perturbations and Robust Properties of Linear Systems, *Information on Journal of Automation and Information Sciences*, vol. 42, iss. 6, 2010, pp. 55–66.
21. Kabanov A. A. *Sintez robustnykh sistem stabilizatsii na osnove teorii singulyarnykh vozmushchenii* (Synthesis of robust stabilization systems based on singular perturbation), *Optimizatsiya Proizv. Progressov*, 2013, vol. 14, pp. 73–79 (in Russian).

В. Х. Пшихопов, д-р техн. наук, проф., pshichop@rambler.ru,
М. Ю. Медведев, д-р техн. наук, проф., medvmihal@sfedu.ru,
Южный федеральный университет, г. Таганрог

Адаптивное позиционное управление подвижными объектами, не линеаризуемыми обратной связью*

Рассматривается задача управления подвижными объектами, модель которых представлена уравнениями кинематики и динамики твердого тела. Исследуются особенности управления, которые возникают, например, при выполнении летательным аппаратом сложных маневров. Задача позиционного управления решается на базе структуры адаптивных беспоисковых систем управления с эталонной моделью. Предлагается процедура синтеза базового позиционно-траекторного регулятора. Проводится анализ асимптотической устойчивости замкнутой нелинейной эталонной системы управления методом функций Ляпунова. Предложена структура и адаптивные алгоритмы управления подвижным объектом. Адаптация полученного базового закона осуществляется на основе ПИ алгоритма. Проведен анализ устойчивости замкнутой системы. Показано, что в линейном приближении характеристическое уравнение замкнутой системы является произведением характеристического уравнения контура эталонной модели, контура управления подвижным объектом и контура адаптации. Приведены результаты численного моделирования, подтверждающие эффективность предложенного метода на примере задачи позиционирования подвижного объекта в точке при действии постоянных и переменных возмущений. Данный подход может применяться для управления динамическими нелинейными объектами с особенностями. Например, управление электрическими приводами, как правило, осуществляется при ненулевом потоке возбуждения. Данный подход позволяет устранить указанные особенности в законах управления.

Ключевые слова: позиционно-траекторное управление, адаптивное управление, подвижный объект, эталонная модель, функция Ляпунова

Введение

Задачи управления подвижными объектами в настоящее время связаны, прежде всего, с необходимостью обеспечения автономных режимов работы. Наиболее актуальными сегодня являются задачи управления движением мобильных роботов. На XII Всероссийском совещании по проблемам управления были отражены актуальные направления развития теории и систем управления мобильными роботами [1, 2]: управление в авиации и космонавтике; управление морскими подвижными объектами; мехатроника, управление и обработка информации в робототехнических системах; навигация подвижных объектов. В пленарных докладах отмечается актуальность задач, связанных с навигацией подвижных объектов, многоцелевым управлением подвижными объектами, функционирующими в различных режимах, организацией управления полетом современных космических аппаратов. Тематика секционных докладов позволяет судить о том, что в настоящее время остаются актуальными проблемы, связанные с высокоточным управлением в маневренных режимах, с расширением режимов функционирования путем применения более подроб-

ных математических моделей, с повышением автономности существующих подвижных объектов, приданием системам управления интеллектуальных свойств и согласованием различных уровней этих систем.

Большое внимание задачам планирования и управления подвижными объектами уделено на 19 Всемирном конгрессе ИФАК по управлению, прошедшем в августе 2014 г. в Кейптауне (ЮАР). Только на пленарной сессии докладов по направлению, посвященному управлению роботами и интеллектуальным системам сделано три доклада (всего восемь докладов). Более 25 % секций конгресса посвящено управлению мобильными роботами, подвижными объектами, планированию, навигации и интеллектуальным методам управления подвижными объектами. Кроме того, большое число докладов представлено по частным проблемам, отражающим особенности среды функционирования подвижных объектов.

Метод позиционно-траекторного управления [3], восходящий своими корнями к работам [4–6], в последнее время успешно применяется в автономных воздухоплавательных комплексах [7–10] и автономных средствах морского базирования [11–13]. Так, методом позиционно-траекторного управления синтезированы базовые алгоритмы прототипа высотной воздухоплавательной платформы, успешно про-

* Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации № НШ-3437.2014.10 и грантом РФФИ 13-08-00315а.

шедшей испытания в декабре 2013 г. в Чаньша (Китай). В марте 2014 г. в Таганрогском заливе успешно испытан прототип безэкипажного катера, осуществляющий автономное движение по заданным маршрутам и способный автоматически обнаруживать и обходить препятствия.

К основным теоретическим ограничениям применяемых в работах [7—13] позиционно-траекторных систем можно отнести два момента.

Во-первых, в алгоритмах позиционно-траекторного управления задается линейная модель замкнутой системы управления, т. е. исходная система линеаризуется. Отметим, что аналогичные ограничения для методов синтеза нелинейных систем встречаются довольно часто, так как при выполнении определенных условий для ряда моделей нелинейных объектов можно эффективно синтезировать управления [14]. В частности, при неособой матрице кинематики модель твердого тела является системой, линеаризуемой обратной связью.

Во-вторых, в работах [7—13] для адаптации системы управления используются наблюдатели возмущений, синтезируемые независимо от контура управления. Это приводит к необходимости повышения быстродействия наблюдателей, что, в свою очередь, повышает чувствительность системы к шумам.

В данной работе адаптация осуществляется в рамках беспоисковых адаптивных систем, основы которых заложены в ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН [15—17]. К настоящему времени данный подход доказал свою эффективность и состоятельность и продолжает развиваться [18, 19]. Так как ряд задач управления подвижными объектами (стыковка, движение в условиях препятствий) требует выполнения заданного качества управления в динамике, то в данной статье используется идеология систем с эталонными моделями [20—22], которые позволяют адаптироваться в переходных процессах.

Синтез контура управления номинальной моделью

Рассмотрим номинальную модель подвижного объекта вида [3]

$$\begin{aligned}\dot{y}_m &= R(y_m)x_m; \\ \dot{x}_m &= M^{-1}(F_{um} + F_{dm}),\end{aligned}\quad (1)$$

где y_m — вектор линейных и угловых положений номинальной модели во внешней системе координат; x_m — вектор линейных и угловых скоростей номинальной модели в связанной системе координат; $R(y_m)$ — матрица кинематики номинальной модели; F_{um} — вектор управляющих сил и моментов номинальной модели; F_{dm} — вектор прочих сил и моментов, действующих на номинальную модель; M —

матрица инерционных параметров номинальной модели; m — индекс, обозначающий переменные номинальной модели подвижного объекта.

Синтезируем для номинальной модели (1) управление, обеспечивающее стабилизацию в заданной точке. При этом замкнутую систему управления номинальной моделью (1) будем называть эталонной моделью. В соответствии с методом позиционно-траекторного управления [3] введем ошибку эталонной модели в виде

$$\Psi_{\text{эт}} = A_1 y_m + A_2, \quad (2)$$

где A_1, A_2 — диагональная матрица и вектор постоянных коэффициентов, отражающие требования к точке позиционирования.

Рассмотрим квадратичную функцию вида

$$V_{\text{эт1}} = 0,5 \Psi_{\text{эт}}^T \Psi_{\text{эт}}. \quad (3)$$

Производная по времени от выражения (3) в силу уравнений (1), (2) равна

$$\dot{V}_{\text{эт1}} = \Psi_{\text{эт}}^T \dot{\Psi}_{\text{эт}} = (A_1 y_m + A_2)^T A_1 R_m x_m. \quad (4)$$

Для того чтобы обеспечить отрицательную определенность функции (4), желаемый вид вектора x_m задается в виде

$$x_m = -Q_{\text{эт}} R_m^T A_1^T (A_1 y_m + A_2), \quad (5)$$

где $Q_{\text{эт}}$ — положительно определенная матрица.

Правая часть выражения (5) является желаемым изменением состояния номинальной модели (1) в течение переходного процесса. На основании (5) формируется вектор ошибок замкнутой системы управления номинальной модели в виде

$$\Psi_{V_{\text{эт}}} = x_m + Q_{\text{эт}} R_m^T A_1^T (A_1 y_m + A_2). \quad (6)$$

Производная по времени от выражения (6) с учетом номинальной модели (1) равна

$$\begin{aligned}\dot{\Psi}_{V_{\text{эт}}} &= M^{-1}(F_{um} + F_{dm}) + Q_{\text{эт}} \dot{R}_m^T A_1^T (A_1 y_m + A_2) + \\ &+ Q_{\text{эт}} R_m^T A_1^T A_1 R_m x_m.\end{aligned}\quad (7)$$

Потребуем, чтобы вектор ошибок (6) подчинялся следующему эталонному дифференциальному уравнению

$$\dot{\Psi}_{V_{\text{эт}}} + T_1 \Psi_{V_{\text{эт}}} = 0, \quad (8)$$

где T_1 — положительно определенная матрица настроек регулятора.

Подставив выражения (6), (7) в уравнение (8), получим уравнение относительно вектора управле-

ния номинальной моделью F_{um} , решение которого имеет вид

$$F_{um} = -F_{dm} + M(-Q_{\text{ЭТ}} \dot{R}_m^T A_1^T (A_1 y_m + A_2) - Q_{\text{ЭТ}} R_m^T A_1^T A_1 R_m x_m - T_1(x_m + Q_{\text{ЭТ}} R_m^T A_1^T (A_1 y_m + A_2))). \quad (9)$$

Здесь предполагается, что производная по времени $\dot{R}_m^T$ измеряется или определяется каким-либо иным способом.

Рассмотрим квадратичную функцию вида

$$V_{\text{ЭТ}2} = 0,5 \Psi_{V_{\text{ЭТ}}}^T \Psi_{V_{\text{ЭТ}}}. \quad (10)$$

Производная от выражения (10) равна

$$\begin{aligned} \dot{V}_{\text{ЭТ}2} &= \Psi_{V_{\text{ЭТ}}}^T \dot{\Psi}_{V_{\text{ЭТ}}} = \\ &= (x_m + Q_{\text{ЭТ}} R_m^T A_1^T (A_1 y_m + A_2))^T (M^{-1}(F_{um} + F_{dm}) + \\ &+ Q_{\text{ЭТ}} \dot{R}_m^T A_1^T (A_1 y_m + A_2) + Q_{\text{ЭТ}} R_m^T A_1^T A_1 R_m x_m). \end{aligned} \quad (11)$$

После подстановки (9) в выражение (11) получим

$$\begin{aligned} \dot{V}_{\text{ЭТ}2} &= -(x_m + Q_{\text{ЭТ}} R_m^T A_1^T (A_1 y_m + A_2))^T \times \\ &\times T_1(x_m + Q_{\text{ЭТ}} R_m^T A_1^T (A_1 y_m + A_2)). \end{aligned} \quad (12)$$

Так как выражение (6) не обращает систему (1), (9) в тождество, то, с учетом дополнения Барбашина—Красовского, замкнутая номинальная система является асимптотически устойчивой.

Уравнения эталонной модели (номинальной модели (1), замкнутой управлением (9)), имеют вид

$$\begin{aligned} \dot{y}_m &= R(y_m) x_m; \\ \dot{x}_m &= -Q_{\text{ЭТ}} \dot{R}_m^T A_1^T (A_1 y_m + A_2) - Q_{\text{ЭТ}} R_m^T A_1^T A_1 R_m x_m - \\ &- T_1(x_m + Q_{\text{ЭТ}} R_m^T A_1^T (A_1 y_m + A_2)). \end{aligned} \quad (13)$$

Синтез контура управления моделью подвижного объекта

Рассмотрим модель подвижного объекта на базе уравнений кинематики и динамики твердого тела [2]

$$\begin{aligned} \dot{y} &= R(y)x; \\ \dot{x} &= M^{-1}(F_u + F_d), \end{aligned} \quad (14)$$

где y — вектор линейных и угловых положений подвижного объекта во внешней системе координат; x — вектор линейных и угловых скоростей подвижного объекта в связанной системе координат; $R(y)$ — матрица кинематики; M — матрица инерционных параметров; F_u — вектор управляющих сил и моментов; F_d — вектор прочих сил и моментов, действующих на подвижный объект.

Матрица $R(y)$ и вектор F_d совпадают по структуре с матрицей $R(y_m)$ и вектором F_{dm} и имеют тот же смысл соответственно.

По аналогии с выражением (6) сформируем цель управления для подвижного объекта в виде

$$\Psi_V = x + Q R^T A_1^T (A_1 y + A_2). \quad (15)$$

Дополним модель подвижного объекта (15) интегратором:

$$\dot{z} = \Psi_V - \Psi_{V_{\text{ЭТ}}}. \quad (16)$$

Введем ошибку позиционно-траекторного контура управления в следующем виде:

$$\begin{aligned} e &= x + Q R^T A_1^T (A_1 y + A_2) - x_m - \\ &- Q_{\text{ЭТ}} R_m^T A_1^T (A_1 y_m + A_2) + Bz, \end{aligned} \quad (17)$$

где B — матрица коэффициентов настройки регуляторов.

Потребуем, чтобы ошибка управления (17) удовлетворяла следующему эталонному уравнению:

$$\dot{e} + T_1 e = 0. \quad (18)$$

Производная по времени от выражения (18) в силу уравнений (1), (13)—(15) равна

$$\begin{aligned} \dot{e} &= M^{-1}(F_u + F_d) + Q \dot{R}^T(y) A_1^T (A_1 y + A_2) + \\ &+ Q R^T(y) A_1^T A_1 R x - \dot{x}_m - Q_{\text{ЭТ}} \dot{R}_m^T(y) A_1^T (A_1 y_m + A_2) - \\ &- Q_{\text{ЭТ}} R_m^T(y) A_1^T A_1 R_m x_m + B(\Psi_V - \Psi_{V_{\text{ЭТ}}}). \end{aligned} \quad (19)$$

Подставив выражения (17), (19) в уравнение (18), получим уравнение, решив которое относительно вектора F_u , найдем управление

$$\begin{aligned} F_u &= -F_d + M\{-Q \dot{R}^T(y) A_1^T (A_1 y + A_2) - \\ &- Q R^T(y) A_1^T A_1 R x + \dot{x}_m + Q_{\text{ЭТ}} \dot{R}_m^T(y) A_1^T (A_1 y_m + A_2) + \\ &+ Q_{\text{ЭТ}} R_m^T(y) A_1^T A_1 R_m x_m - B(\Psi_V - \Psi_{V_{\text{ЭТ}}}) - T_1 e\}. \end{aligned} \quad (20)$$

Рассмотрим теперь квадратичную функцию вида

$$V = 0,5 e^T e. \quad (21)$$

Производная по времени от функции (21) с учетом уравнений (1), (13)—(15), (19), (20) равна

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e^T \dot{e} = -\{x + Q R^T A_1^T (A_1 y + A_2) - x_m - \\ &- Q_{\text{ЭТ}} R_m^T A_1^T (A_1 y_m + A_2) + Bz\}^T T_1 \{x + Q R^T A_1^T (A_1 y + \\ &+ A_2) - x_m - Q_{\text{ЭТ}} R_m^T A_1^T (A_1 y_m + A_2) + Bz\}. \end{aligned} \quad (22)$$

Таким образом, с учетом дополнения Барбашина—Красовского замкнутая система управления (1), (9), (13)—(15), (20) является асимптотически устойчивой по Ляпунову.

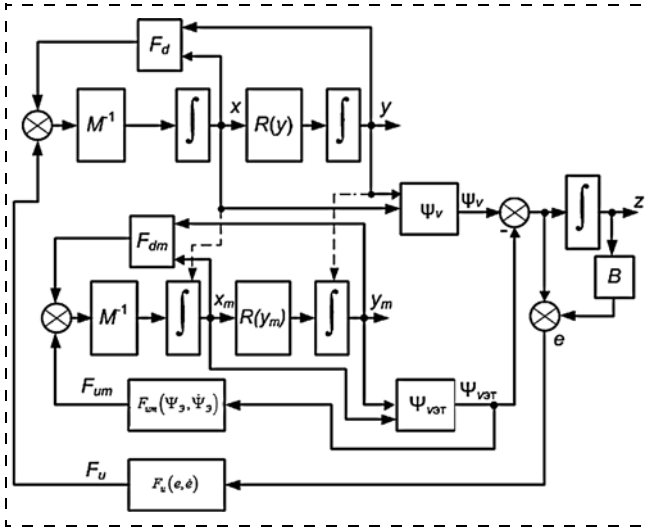


Рис. 1. Структура адаптивной позиционно-траекторной системы

При этом в алгоритме управления (9), (20) отсутствует операция обращения матриц кинематики $R(y)$ и $R(y_m)$, т. е. указанный алгоритм управления может применяться при произвольных углах тангажа подвижного объекта.

Структура адаптивной позиционно-траекторной системы управления (1), (9), (13)—(15), (20) представлена на рис. 1.

Из структуры, представленной на рис. 1, видно, что эталонная модель генерирует номинальную траекторию управляемого подвижного объекта, которая обрабатывается позиционно-траекторным регулятором как следящей системой. Адаптация осуществляется за счет интегральной составляющей. Отметим, что в данной структуре не корректируется поведение эталонной модели, полагается, что требования к траектории подвижного объекта заданы жестко.

В структуре системы контуры эталонной модели, адаптации и управления подвижным объектом соединены каскадно. Это позволяет изменять настройки каждого из перечисленных контуров независимо друг от друга. Это можно показать, проведя анализ замкнутой системы при медленно изменяющихся углах ориентации подвижного объекта. В этом случае матрицы кинематики $R(y)$ и $R(y_m)$ можно принять постоянными, и уравнения замкнутой системы относительно нулевого положения имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{y} &= Rx; \\ \dot{x} &= -(B + T_1)QR^T A_1^T A_1 y - (B + T_1 + QR^T A_1^T A_1 R)x - \\ &\quad - T_1 Bz + BQ_{ЭТ} R_m^T A_1^T A_1 y_m + Bx_m; \\ \dot{z} &= QR^T A_1^T A_1 y + x - Q_{ЭТ} R_m^T A_1^T A_1 y_m - x_m; \\ \dot{y}_m &= R(y_m)x_m; \\ \dot{x}_m &= -T_1 Q_{ЭТ} R_m^T A_1^T A_1 y_m - (T_1 + Q_{ЭТ} R_m^T A_1^T A_1 R_m)x_m. \end{aligned} \quad (23)$$

Характеристическое уравнение системы (23) имеет вид

$$\begin{aligned} D(s) &= (s^3 + (T_1 + B + QR^T A_1^T A_1 R)s^2 + \\ &\quad + (T_1 B + (T_1 + B)QR^T A_1^T A_1 R)s + \\ &\quad + T_1 BQ_{ЭТ} R_m^T A_1^T A_1 R)(s^2 + (T_1 + Q_{ЭТ} R_m^T A_1^T A_1 R_m)s + \\ &\quad + T_1 + Q_{ЭТ} R_m^T A_1^T A_1 R_m) = (s + T_1)(s + QR^T A_1^T A_1 R) \times \\ &\quad \times (s + B)(s + T_1)(s + Q_{ЭТ} R_m^T A_1^T A_1 R_m). \end{aligned} \quad (24)$$

Таким образом, характеристическое уравнение (24) является произведением уравнений контура эталонной модели, контура адаптации и контура управления подвижным объектом. При этом часть корней характеристического уравнения зависит от матриц $R(y)$ и $R(y_m)$, что обусловлено отсутствием процедуры линеаризации обратной связи.

Результаты моделирования

На рис. 2 представлены результаты моделирования синтезированной адаптивной системы управления (1), (9), (13)—(15), (20).

Моделирование проводили для следующих параметров и матриц объекта управления и регулятора:

$$R = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & A_\omega \end{bmatrix};$$

$$A = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\vartheta & -\cos\psi\sin\vartheta\cos\gamma + \cos\psi\sin\vartheta\sin\gamma + \sin\psi\sin\gamma & \sin\psi\cos\gamma \\ \sin\vartheta & \cos\vartheta\cos\gamma & -\cos\vartheta\sin\gamma \\ -\sin\psi\cos\vartheta & \cos\psi\sin\gamma + \sin\psi\sin\vartheta\cos\gamma & \cos\psi\cos\gamma - \sin\psi\sin\vartheta\sin\gamma \end{bmatrix};$$

$$\Delta F_d = \begin{bmatrix} 18\cos(0,8t) \\ 10 + 15\sin t \\ 25\sin(1,3t) \\ 0 \\ 30\sin t \\ 0 \end{bmatrix}; A_\omega = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\cos\gamma}{\cos\vartheta} & -\frac{\sin\gamma}{\cos\vartheta} \\ 0 & \sin\gamma & \cos\gamma \\ 1 & -\operatorname{tg}\vartheta\cos\gamma & \operatorname{tg}\vartheta\sin\gamma \end{bmatrix};$$

$$M = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100 \end{bmatrix}; F_d^0 = F_{dm} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; A_2 = \begin{bmatrix} -10 \\ -10 \\ -10 \\ 0 \\ 1,57 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$T_1 = I, Q_{ЭТ} = Q = I, A_1 = I, B = 10I,$$

где I — единичная матрица размерностью 6×6 .

На рис. 3 представлены графики изменения угла тангажа, из которых видно, что система осуществляет позиционирование подвижного объекта при угле тангажа 1,57 рад. При этом по каналу тангажа действует возмущение.

Отметим, что на графиках переменных, представленных на рис. 2, хорошо видны колебания, обусловленные гармоническими возмущениями. Однако эти колебания могут быть сделаны достаточно малыми за счет увеличения значений коэффициентов матрицы B , что легко увидеть, записав передаточную замкнутой системы функцию по возмущению:

$$W_f(s) = \frac{y(s)}{\Delta F_d(s)} = \frac{RM^{-1}s}{(s + T_1)(s + QR^T A_1^T A_1 R)(s + B)} \quad (25)$$

Подавление возмущения осуществляется за счет матрицы B , так как матрицы T_1 , Q определяют желаемое изменение координат и могут изменяться только верхним уровнем управления.

Заключение

В данной работе решается задача адаптивного позиционирования подвижных объектов при наличии неизмеряемых возмущений. Для решения задачи применяется адаптивная система, базовый закон управления которой синтезируется на основе метода позиционно-траекторного управления, а адаптация осуществляется в рамках структуры беспоисковых систем с эталонными моделями. Предложенный алгоритм адаптивного управления отличается пропорционально-интегральным алгоритмом слежения за сигналом эталонной модели и процедурой синтеза базового регулятора, позволяющей не обращать матрицу кинематики подвижного объекта. Обратная связь для эталонной модели в синтезированной адаптивной системе (см. рис. 1) обеспечивает коррекцию начальных условий эталонной модели на основе показаний датчиков. Указанная коррекция может осуществ-

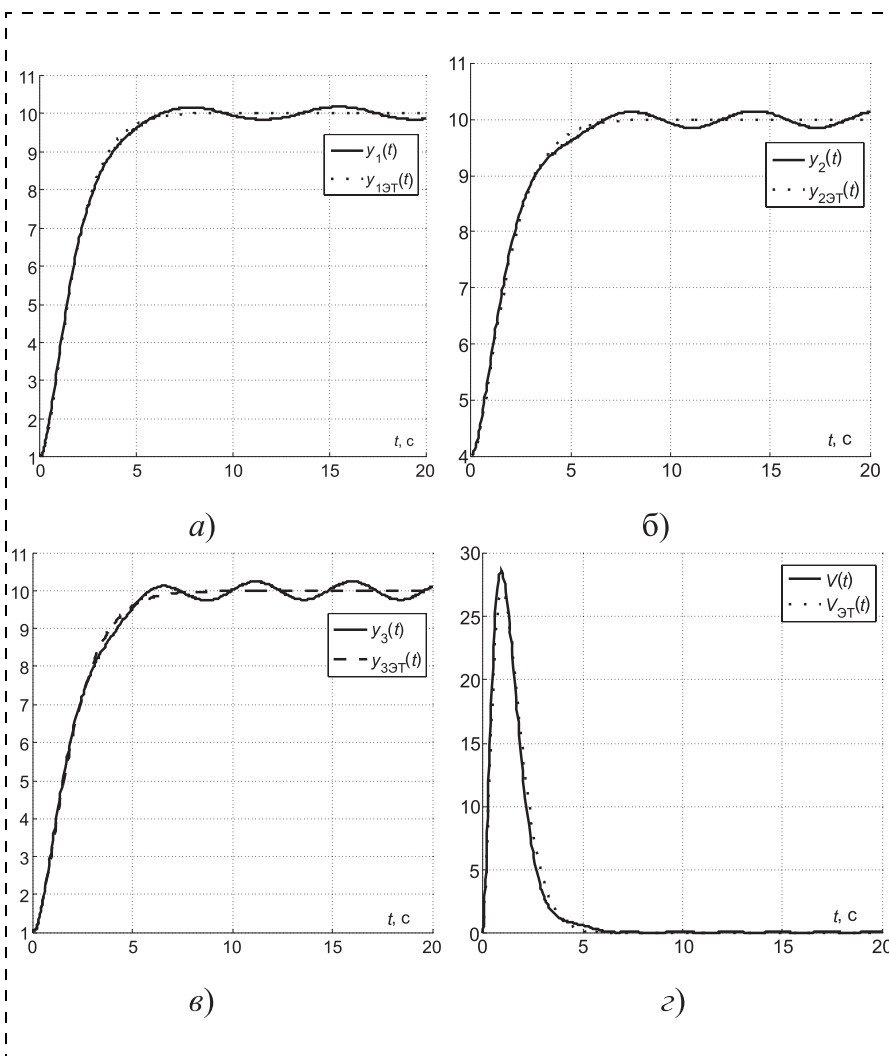


Рис. 2. Результаты моделирования адаптивной системы:

a — переменная y_1 ; b — переменная y_2 ; c — переменная y_3 ; d — квадрат скорости ПО

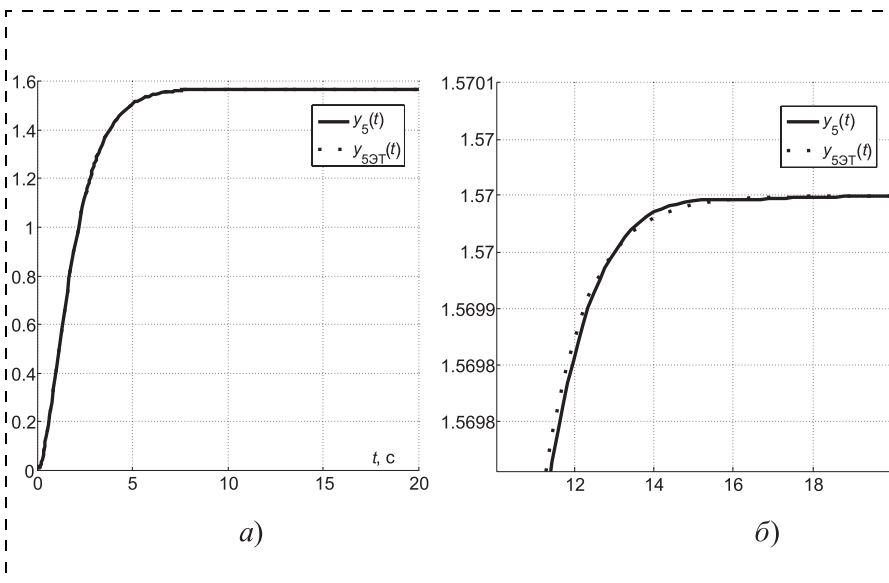


Рис. 3. Изменение угла тангажа подвижного объекта:

a — угол тангажа y_5 ; b — фрагмент графика угла тангажа

латься только в начальный момент времени или непрерывно. Например, при движении в среде с препятствиями или при выполнении стыковки желаемая траектория подвижного объекта задается достаточно жестко. В этом случае при появлении отклонения система должна обеспечивать возвращение подвижного объекта на заданную траекторию. Здесь система представляет собой генератор желаемой траектории и следящую подсистему с ПИ адаптацией. Если же отклонение от траектории допускается (например, при движении вдали от препятствий), то при появлении отклонения можно строить эталонную траекторию из текущей точки. В этом случае коррекция начальных условий эталонной модели проводится непрерывно, и замкнутая система принципиально отличается от следящей системы.

Проведенный анализ показал, что синтезированная замкнутая система асимптотически устойчива по Ляпунову, допускает, в отличие от работ [8, 12, 23], отдельную настройку контура эталонной модели, контура адаптации и базового контура управления подвижным объектом.

Список литературы

1. Черноусько Ф. Л., Болотник Н. Н., Градецкий В. Г. Мобильные роботы: проблемы управления и оптимизации движений // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления. ВСПУ-2014. Москва, ИПУ РАН. 2014.
2. XII Всероссийское совещание по проблемам управления: аналитический обзор. URL: <http://vspu2014.ipu.ru/taxonomy/term/101>
3. Пшихопов В. Х., Медведев М. Ю. Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. М.: Наука, 2011. 350 с.
4. Еругин Н. П. Построение всего множества систем дифференциальных уравнений, имеющих заданную интегральную кривую // Прикладная математика и механика. 1952. Вып. 6. С. 659—670.
5. Бойчук Л. М. Метод структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления. М.: Энергия, 1971. 112 с.
6. Галиуллин А. С. Методы решения обратных задач динамики. М.: Наука, 1986. 224 с.
7. Пшихопов В. Х., Медведев М. Ю., Гайдук А. Р., Нейдорф Р. А., Беляев В. Е., Федоренко Р. В., Костюков В. А., Крухмалев В. А. Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: математическая модель // Мехатроника, автоматизация и управление. 2013. № 6. С. 14—21.
8. Пшихопов В. Х., Медведев М. Ю., Гайдук А. Р., Нейдорф Р. А., Беляев В. Е., Федоренко Р. В., Костюков В. А., Крухмалев В. А. Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: алгоритмы управления // Мехатроника, автоматизация и управление. 2013. № 7. С. 13—20.
9. Pshikhopov V. Kh., Medvedev M., Gaiduk A., Belyaev V., Fedorenko R., Krukhtmalev V. // Position-trajectory control system for robot on base of airship. 2013 Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. 2013. P. 3590—3595.

10. Pshikhopov V. Kh., Medvedev M. Yu., Gaiduk A. R., Fedorenko R. V., Krukhtmalev V. A., Gurenko B. V. Position-Trajectory Control System for Unmanned Robotic Airship. Preprints of the 19th World Congress the International Federation of Automatic Control. Cape Town, South Africa. August 24—29, 2014. P. 8953—8958.

11. Pshikhopov V. Kh., Medvedev M. Y., and Gurenko B. V. Homing and Docking Autopilot Design for Autonomous Underwater Vehicle // Applied Mechanics and Materials Vols. 490—491 (2014). P. 700—707. Trans Tech Publications, Switzerland. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.490-491.700.

12. Пшихопов В. Х., Федотов А. А., Медведев М. Ю., Медведева Т. Н., Гуренко Б. В. Позиционно-траекторная система прямого адаптивного управления морскими подвижными объектами // Инженерный вестник Дона. 2014. № 3.

13. Пшихопов В. Х., Суконкин С. Я., Нагучев Д. Ш., Стракович В. В., Медведев М. Ю., Гуренко Б. В., Костюков В. А., Волощенко Ю. П. Автономный подводный аппарат "Скат" для решения задач поиска и обнаружения затонувших объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 3 (104). С. 153—162.

14. Гайдук А. Р. Синтез нелинейных систем на основе управляемой формы Жордана // Автоматика и телемеханика. 2006. № 7. С. 3—13.

15. Рутковский В. Ю., Крутова И. Н. Принцип построения и некоторые вопросы теории одного класса самонастраивающихся систем с моделью // Самонастраивающиеся автоматические системы: Труды I Всесоюзной конференции по теории и практике самонастраивающихся систем (10—14 декабря 1963). 1965. С. 46—63.

16. Рутковский В. Ю., Ссорин-Чайков В. Н. Самонастраивающиеся системы с пробным сигналом // Самонастраивающиеся автоматические системы: Труды I Всесоюзной конференции по теории и практике самонастраивающихся систем (10—14 декабря 1963). 1965. С. 93—111.

17. Zemlyakov S. D. Some problem of analytical synthesis in model reference control systems by the direct method of Lyapunov. Theory of self adaptive control system // Proc. of International Symposium, England, Teddington, 1965. New-York: P. H. Hummon Plenum Press, 1966. P. 175—179.

18. Рутковский В. Ю. Работы института проблем управления в области беспоисковых адаптивных систем и систем управления космическими аппаратами // Автоматика и телемеханика. 1999. № 6. С. 42—49.

19. Земляков С. Д., Рутковский В. Ю. О некоторых результатах развития теории и практики применения беспоисковых адаптивных систем // Автоматика и телемеханика. 2001. № 7. С. 103—121.

20. Рутковский В. Ю., Глумов В. М., Суханов В. М. Физически реализуемый алгоритм адаптивного управления с эталонной моделью // Автоматика и телемеханика. 2011. № 8. С. 96—108.

21. Земляков С. Д., Рутковский В. Ю. Алгоритм функционирования адаптивной системы с эталонной моделью, гарантирующий заданную динамическую точность управления нестационарным динамическим объектом в условиях неопределенности // Автоматика и телемеханика. 2009. № 10. С. 35—44

22. Глумов В. М., Земляков С. Д., Рутковский В. Ю., Суханов В. М. Применение принципа построения адаптивных систем с эталонной моделью к задачам мониторинга текущего состояния трансмиссионных валов // Автоматика и телемеханика. 2003. № 5. С. 131—146.

23. Медведев М. Ю. Алгоритмы адаптивного управления исполнительными приводами // Мехатроника, автоматизация и управление. 2006. № 6. С. 17—22.

Adaptive Position-Path Control of Vehicles without a Feedback Linearization

V. Kh. Pshikhopov, pshichop@rambler.ru, M. Yu. Medvedev, medvmihal@sfsedu.ru ✉, Southern Federal University, Taganrog, 347928, Russian Federation

Corresponding author: Medvedev Mikhail Yu., D. Sc., Professor, Southern Federal University, Taganrog, 347928, Russian Federation, e-mail: medvmihal@sfsedu.ru

Received on December 12, 2014

Accepted January 14, 2015

The topic of the article is the mobile objects' control, a model of which is presented by the equations of kinematics and dynamics of rigid bodies and the specific features of control for maneuvers requiring pitch angles of 90 degrees or over. Such tasks may involve specific problems, which do not allow us to present the desired dynamics of the closed-loop system in the form of a linear equation, that is, the system cannot be linearized by a feedback. The problem is solved due to application of the adaptive control systems with a reference model. In the article a procedure is proposed for a synthesis of a basic position-trajectory control. Basic control for a reference model was designed on the base of the method of Lyapunov functions. Adaptation of the basic control is carried out by the proportional and integral algorithms. The article presents a block-diagram of the closed-loop system and proves the stability of the adaptive control system. It shows that in a linear approximation, a characteristic equation of the closed-loop system is a product of a characteristic equation of the reference model, the mobile object, and the adaptation subsystem. The authors also present the modeling results. The proposed approach can also be used for different nonlinear systems with peculiarities. For example, in the electrical drives the field control voltage ensures a nonzero nominal flux at the first stage. Then, the supply control voltage ensures a nominal shaft rotation speed or torque. This approach allows us to control the shaft rotation speed with a zero field control voltage.

Keywords: position-path control, adaptive control, mobile object, reference model, function of Lyapunov

Acknowledgements: This work was supported by grant No. HII-3437.2014.10 of the President of the Russian Federation and by a grant from the Russian Foundation for Basic Research, project No. 13-08-00315a.

For citation:

Pshikhopov V. Kh., Medvedev M. Yu. Adaptive Position-Path Control of Vehicles without a Feedback Linearization, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 8, pp. 523—530.

DOI: 10.17587/mau.16.523-530

References

1. Chernous'ko F. L., Bolotnik N. N., Gradeckij V. G. *Mobil'nye roboty: problemy upravleniya i optimizatsii dvizhenij* (Mobile robots: problems of control and movement optimization), In *Proc. of XII Russian conference on control problems. VSPU-2014*, Moscow, Institute of Control Problems RAS, 2014 (in Russian).
2. *XII Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya: analiticheskij obzor* (XII Russian conference on control problems: analytical review), available at: <http://vspu2014.ipu.ru/taxonomy/term/101>
3. Pshikhopov V. H., Medvedev M. Ju. *Upravlenie podvizhnymi ob'ektami v opredelennykh i neopredelennykh sredakh* (Control of vehicles in certain and uncertain environments), Moscow, Nauka, 2011, 350 p. (in Russian).
4. Erugin N. P. *Postroenie vsego mnozhestva sistem differentsial'nykh uravnenij, imeju-shhih zadannuju integral'nuju krivuju* (Construction of the entire set of differential equations systems with given integral curve), *Prikladnaja Matematika i Mehanika*, 1952, iss. 6, pp. 659—670 (in Russian).
5. Bojchuk L. M. *Metod strukturnogo sinteza nelinejnykh sistem avtomaticheskogo upravleniya* (Method of structure design of nonlinear automatic control systems), Moscow, Jenergiya, 1971, 112 p. (in Russian).
6. Galiullin A. S. *Metody resheniya obratnykh zadach dinamiki* (Solution methods of inverse dynamics problems), Moscow, Nauka, 1986, 224 p. (in Russian).
7. Pshikhopov V. H., Medvedev M. Ju., Gajduk A. R., Nejdorf R. A., Beljaev V. E., Fedorenko R. V., Kostjukov V. A., Kruhmalev V. A. *Sistema pozicionno-traekornogo upravleniya robotizirovannoj vozduhoplavitel'noj platformoj: matematicheskaja model'* (Position-trajectory control system for robot on base of airship: mathematical model), *Mekhatronika, Avtomatizatsija, Upravlenie*, 2013, no. 6, pp. 14—21 (in Russian).
8. Pshikhopov V. H., Medvedev M. Ju., Gajduk A. R., Nejdorf R. A., Beljaev V. E., Fedorenko R. V., Kostjukov V. A., Kruhmalev V. A. *Sistema pozicionno-traekornogo upravleniya robotizirovannoj vozduhoplavitel'noj platformoj: algoritmy upravleniya* (Position-trajectory control system for robot on base of airship: control algorithms), *Mekhatronika, Avtomatizatsija, Upravlenie*, 2013, no. 7, pp. 13—20 (in Russian).
9. Pshikhopov V. Kh., Medvedev M., Gaiduk A., Belyaev V., Fedorenko R., Kruhmalev V. Position-trajectory control system for robot on base of airship. 2013, *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 3590—3595.
10. Pshikhopov V. Kh., Medvedev M. Yu., Gaiduk A. R., Fedorenko R. V., Kruhmalev V. A., Gurenko B. V. Position-Trajectory Control System for Unmanned Robotic Airship. Preprints of the 19th World Congress the International Federation of Automatic Control. Cape Town, South Africa. August 24—29, 2014, pp. 8953—8958.
11. Pshikhopov V. Kh., Medvedev M. Y., and Gurenko B. V. Homing and Docking Autopilot Design for Autonomous Underwater Vehicle, *Applied Mechanics and Materials*, vol. 490—491 (2014), pp. 700—707. Trans Tech Publications, Switzerland. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.490-491.700.
12. Pshikhopov V. Kh., Fedotov A. A., Medvedev M. Ju., Medvedeva T. N., Gurenko B. V. *Pozicion-no-traekornaja sistema prjamo adaptivnogo upravleniya morskimi podvizhnymi ob'ektami* (Position-path system of a direct adaptive control for marine vehicles), *Inzhenernyj Vestnik Dona*, 2014, no. 3 (in Russian).
13. Pshikhopov V. Kh., Sukonkin S. Ja., Naguchev D. Sh., Strakovich V. V., Medvedev M. Ju., Gurenko B. V., Kostjukov V. A., Voloshchenko Ju. P. *Avtonomnyj podvodnyj apparat "Skat" dlja reshenija zadach poiska i obnaruzhenija zailennykh ob'ektov* (Autonomous underwater vehicle "Skat" for search and detection of objects silted), *Izvestija JuFU. Tehniceskie Nauki*, 2010, no. 3 (104), pp. 153—162 (in Russian).
14. Gajduk A. R. *Sintez nelinejnykh sistem na osnove upravljaemoj formy Zhordana* (Design of nonlinear systems on base of controlled Jordan form), *Avtomatika i Telemekhanika*, 2006, no. 7, pp. 3—13 (in Russian).
15. Rutkovskij V. Ju., Krutova I. N. *Princip postroenija i nekotorye voprosy teorii odnogo klassa samonastraivajushhiesja sistem s model'ju* (Principle of construction and some questions of the one class theory of self-tuning systems with model), *Samonastraivajushhiesja avtomaticheskie sistemy: Proc. of I All-Union Conference on theory and practice of self-tuning systems*, 10—14 December, 1963, Moscow, 1965, pp. 46—63 (in Russian).
16. Rutkovskij V. Ju., Ssorin-Chajkov V. N. *Samonastraivajushhiesja sistemy s probnym signalom* (Self-tuning systems with a test signal), *Samonastraivajushhiesja avtomaticheskie sistemy: Proc. of I All-Union Conference on theory and practice of self-tuning systems*, 10—14 December, 1963, Moscow, 1965, pp. 93—111 (in Russian).

17. Zemljakov S. D. Some problem of analytical synthesis in model reference control systems by the direct method of Lyapunov. Theory of self adaptive control system, *Proc. of International Symposium*, England, Teddington, 1965, New-York: P. H. Hummon Plenum Press, 1966, pp. 175–179.

18. Rutkovskij V. Ju. *Raboty instituta problem upravleniya v oblasti bespoiskovykh adaptivnykh sistem i sistem upravleniya kosmicheskimi apparatami* (Researches of Control Problem Institute in the field of searchless adaptive systems and space vehicles control systems), *Avtomatika i Telemekhanika*, 1999, no. 6, pp. 42–49 (in Russian).

19. Zemljakov S. D., Rutkovskij V. Ju. *O nekotorykh rezul'tatah razvitiya teorii i praktiki primeneniya bespoiskovykh adaptivnykh sistem* (About development of theory and practice of searchless adaptive systems), *Avtomatika i Telemekhanika*, 2001, no. 7, pp. 103–121 (in Russian).

20. Rutkovskij V. Ju., Glumov V. M., Suhanov V. M. *Fizicheski realizuemyj algoritm adaptivnogo upravleniya s jetalonnnoj model'ju* (Physically implemented algorithm of adaptive control with a reference model), *Avtomatika i Telemekhanika*, 2011, no. 8, pp. 96–108 (in Russian).

21. Zemljakov S. D., Rutkovskij V. Ju. *Algoritmy funkcionirovaniya adaptivnoj sistemy s jetalonnnoj model'ju, garantirujushhij zadannuju dinamicheskiju tochnost' upravleniya ne-stacionarnym dinamicheskim ob'ektom v usloviyakh neopredelennosti* (Algorithm of the adaptive system with a reference model with given dynamical accuracy of control of time-depended dynamical object with uncertainties), *Avtomatika i Telemekhanika*, 2009, no. 10, pp. 35–44 (in Russian).

22. Glumov V. M., Zemljakov S. D., Rutkovskij V. Ju., Suhanov V. M. *Primenenie principa postroeniya adaptivnykh sistem s jetalonnnoj model'ju k zadacham monitoringa tekushhego so-stojaniya transmisionnykh valov* (Application of the adaptive systems with a reference model principle for monitoring of line shafts state), *Avtomatika i Telemekhanika*, 2003, no. 5, pp. 131–146 (in Russian).

23. Medvedev M. Ju. *Algoritmy adaptivnogo upravleniya ispolnitelnymi privodami* (Algorithms of an adaptive control of actuating motors), *Mekatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2006, no. 6, pp. 17–22 (in Russian).

УДК 681.51

DOI: 10.17587/mau.16.530-535

С. Л. Зенкевич, д-р физ.-мат. наук, проф., zenkev@bmstu.ru,

Н. К. Галустьян, аспирант, narekgalustyan@gmail.com,

Научно-учебный центр "Робототехника" МГТУ им. Н. Э. Баумана

Синтез и апробация алгоритма управления движением квадрокоптера по траектории

Решается задача управления по траектории движением квадрокоптера — беспилотного летательного аппарата, выполненного по вертолетной схеме с четырьмя пропеллерами. Решение этой задачи включило в себя следующие этапы: разработка динамической модели движения квадрокоптера, линеаризация динамической модели, синтез алгоритма управления движением по траектории с использованием ПД регулятора, построение моделей и компьютерная апробация разработанных алгоритмов.

Приведены результаты моделирования применения синтезированного алгоритма для управления движением квадрокоптера.

Ключевые слова: квадрокоптер, математическая модель, динамическая модель, угловая стабилизация, управление по траектории, моделирование движения

Введение

Одним из прогрессивных видов беспилотных летательных аппаратов микрокласса являются мультикоптеры, набирающие всю большую популярность в гражданском и военном секторах. Мультикоптеры, в частности квадрокоптеры, обладают всеми преимуществами летательных аппаратов вертолетного типа (возможностями зависания в пространстве, вертикального взлета и посадки, высокой маневренностью в закрытых помещениях и др.), при этом, в отличие от вертолетов, имеют простой и экономичный механизм, не требующий сложного технического обслуживания.

Данные летательные аппараты в полуавтономном режиме способны выполнять следующие задачи: инспекция в зонах пожаров, бедствий и разрушений; поисковые и спасательные операции; мониторинг зон с фото- и видеофиксацией; транспортировка полезных грузов; построение карт окружающей среды и др.

Анализ литературы показал, что система управления движением квадрокоптера базируется на линейно-квадратичных регуляторах [5], ПД или ПИД

регуляторах [1–4], нечетких регуляторах [7] и нейросетевых регуляторах. Интересными работами, посвященными системе управления квадрокоптером, можно считать работы [2–3], где для управления ориентацией квадрокоптера используется ошибка по матрице поворота, что позволяет обойтись без вычисления углов и связанных с этим сингулярностей. В работе [3] также рассмотрена реализованная и апробированная в лабораторных условиях система управления группой квадрокоптеров. Однако практическая ценность данной разработки является не очевидной, поскольку требуются точные координаты каждого квадрокоптера для плотного движения стро-ем (в лаборатории используется система камер).

Глубоким исследованием динамической модели движения квадрокоптера отличается работа [6], где аргументируется тот факт, что аэродинамика корпуса летающей платформы, эффект "биения лопасти", другие аэродинамические эффекты влияют незначительно на малых скоростях, например при зависании, однако уже на средних скоростях влияние усиливается.

Из российских работ можно отметить статью [13], где решается задача синтеза управления для движения квадрокоптера по заданной траектории.

Динамическая модель движения квадрокоптера

Система координат и основные параметры движения. Движение квадрокоптера рассматривается с помощью двух систем координат: неподвижной системы координат (НСК), связанной с Землей, и подвижной системы координат, связанной с квадрокоптером (рис. 1). Начало координат ПСК совпадает с центром масс квадрокоптера.

Квадрокоптер имеет шесть степеней свободы: три угла и три линейные координаты центра масс. В движении квадрокоптера будем учитывать 12 параметров: (φ, θ, ψ) — углы вращения; $\Omega = (p, q, r)$ — вектор угловой скорости (проекции на оси ПСК); $\mathbf{r} = (x, y, z)$ — вектор положения центра масс квадрокоптера; $\dot{\mathbf{r}} = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$ — вектор линейной скорости.

Матрица поворота $\mathbf{R}_{BE}$ между НСК и ПСК имеет следующий вид:

$$\mathbf{R}_{BE} = \begin{bmatrix} c_\psi c_\theta & c_\psi s_\theta s_\varphi - c_\varphi s_\psi & s_\varphi s_\psi + c_\varphi c_\psi s_\theta \\ c_\theta s_\psi & c_\varphi c_\psi + s_\varphi s_\psi s_\theta & c_\varphi s_\psi s_\theta - c_\psi s_\varphi \\ -s_\theta & c_\theta s_\varphi & c_\varphi c_\theta \end{bmatrix},$$

где для компактности выражения используется следующее обозначение: $\sin \alpha = s_\alpha$, $\cos \alpha = c_\alpha$.

Угловая скорость. Компоненты вектора угловой скорости имеют следующую взаимосвязь с матрицей поворота [9]:

$$\hat{\Omega} = \dot{\mathbf{R}} \mathbf{R}^T,$$

следовательно

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & s_\varphi \operatorname{tg} \theta & c_\varphi \operatorname{tg} \theta \\ 0 & c_\varphi & -s_\varphi \\ 0 & s_\varphi / c_\theta & c_\varphi / c_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}. \quad (1)$$

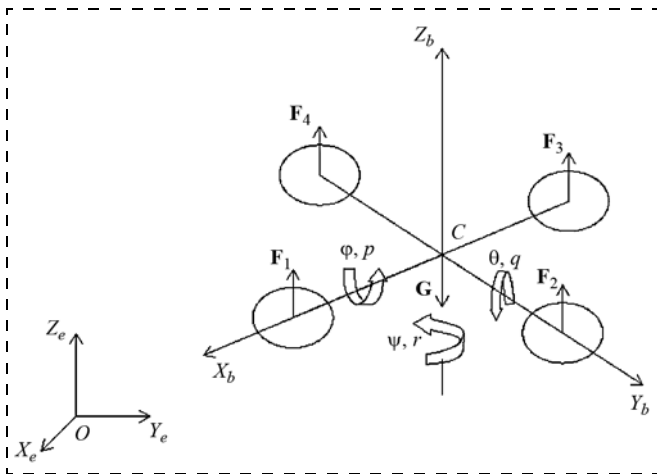


Рис. 1. Система координат и силы, действующие на квадрокоптер

Силы и моменты, действующие на квадрокоптер.

Пропеллеры квадрокоптера вращаются со скоростью ω_i . При вращении пропеллеров возникают подъемные силы F_i и моменты M_i (аналогично несущему винту вертолета), вращающие квадрокоптер вокруг собственной оси (рис. 1), модули которых рассчитываются как

$$F_i = K_F \omega_i, \quad M_i = K_M \omega_i,$$

где K_F и K_M — константы. Следует отметить, что на практике динамические изменения пропеллеров происходят значительно быстрее динамических изменений твердого тела и аэродинамических изменений [4]. Следовательно, в качестве допущения при синтезе системы управления принимается, что угловые скорости вращения пропеллеров можно изменять моментально, и управление квадрокоптером осуществляется с помощью четырех силомоментных параметров $(u_1, u_2, u_3, u_4)^T = (F_{Z_B}, M_{X_B}, M_{Y_B}, M_{Z_B})^T$:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_F & K_F & K_F & K_F \\ 0 & K_F L & 0 & -K_F L \\ -K_F L & 0 & K_F L & 0 \\ K_M & -K_M & K_M & -K_M \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix},$$

где L — расстояние между центром масс и осями пропеллеров.

Второй закон Ньютона для квадрокоптера имеет следующий вид:

$$m \ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{F} + \mathbf{G}, \quad (2)$$

где $\mathbf{F}$ — равнодействующая подъемная сила пропеллеров; $\mathbf{G}$ — сила тяжести; m — масса квадрокоптера. Следующие аэродинамические эффекты не были учтены в силу сложности их учета и незначительного воздействия при невысоких скоростях полета [6]: изменение подъемной силы за счет дополнительного набегающего воздуха при полете квадрокоптера; изменение вектора подъемных сил за счет эффекта биения лопастей; сопротивление воздуха; ветер; гироскопический момент; эффект отражения воздушного потока пропеллера от поверхности Земли при посадке и взлете.

В отличие от работы [8] спроецируем (2) на оси НСК и получим:

$$m \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{BE} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где g — ускорение свободного падения.

Уравнение Эйлера, описывающее вращение твердого тела, в векторной форме имеет вид

$$\mathbf{I}_B \dot{\boldsymbol{\Omega}}_B = -\boldsymbol{\Omega}_B \times \mathbf{I}_B \boldsymbol{\Omega}_B + \begin{bmatrix} u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $\mathbf{I}_B$ — тензор момента инерции, $\boldsymbol{\Omega}_B$ — вектор угловой скорости в ПСК, $\dot{\boldsymbol{\Omega}}_B$ — относительная производная вектора угловой скорости (производная в ПСК). Спроецируем уравнение (4) на оси ПСК квадрокоптера (в работе [8] можно найти вывод нижеследующих уравнений из закона изменения кинетического момента для центра масс):

$$\begin{cases} I_{XX} \dot{p} = u_2 - qr(I_{ZZ} - I_{YY}); \\ I_{YY} \dot{q} = u_3 + pr(I_{ZZ} - I_{XX}); \\ I_{ZZ} \dot{r} = u_4, \end{cases} \quad (5)$$

где I_{XX} , I_{YY} , I_{ZZ} — осевые моменты инерции.

Система уравнений движения квадрокоптера. Таким образом, совокупность уравнений (1), (3) и (5) определяет следующую систему уравнений движения квадрокоптера:

$$\begin{cases} \dot{\varphi} = p + (s_{\varphi} \operatorname{tg} \theta) q + (c_{\varphi} \operatorname{tg} \theta) r; \\ \dot{\theta} = c_{\varphi} q + (-s_{\varphi}) r; \\ \dot{\psi} = (s_{\varphi}/c_{\theta}) q + (c_{\varphi}/c_{\theta}) r; \\ \ddot{x} = (u_1/m)(s_{\varphi} s_{\psi} + c_{\varphi} c_{\psi} s_{\theta}); \\ \ddot{y} = (u_1/m)(c_{\varphi} s_{\psi} s_{\theta} - c_{\psi} s_{\varphi}); \\ \ddot{z} = (u_1/m)(c_{\varphi} c_{\theta}) - g; \\ \dot{p} = (u_2 - qr(I_{ZZ} - I_{YY}))/I_{XX}; \\ \dot{q} = (u_3 + pr(I_{ZZ} - I_{XX}))/I_{YY}; \\ \dot{r} = u_4/I_{ZZ}. \end{cases}$$

Линеаризация системы уравнений. Рассмотрим вектор состояния $\mathbf{x} = (\varphi \ \theta \ \psi \ p \ q \ r)^T$. Линеаризуем систему из уравнений (3) и (5) относительно режима зависания квадрокоптера. Программное движение будет иметь вид

$$\mathbf{x}_d(t) = (0 \ 0 \ \psi_d \ 0 \ 0 \ 0)^T; \quad \mathbf{u}_d(t) = (u_h \ 0 \ 0 \ 0)^T,$$

где $\mathbf{x}_d(t)$ — программный (желаемый) вектор состояния; $\mathbf{u}_d(t)$ — программный вектор управления; $u_h = mg$ — равнодействующая подъемная сила пропеллеров, равная силе тяжести.

Линеаризованная в окрестности программного движения система из уравнений (3) и (5) имеет вид

$$\begin{cases} \ddot{x} = (u_1/m)(\varphi s_{\psi_d} + \theta c_{\psi_d}); \\ \ddot{y} = (u_1/m)(\theta s_{\psi_d} - \varphi c_{\psi_d}); \\ \ddot{z} = u_1/m - g; \\ \dot{p} = u_2/I_{XX}; \\ \dot{q} = u_3/I_{YY}; \\ \dot{r} = u_4/I_{ZZ}. \end{cases} \quad (6)$$

Отметим, что линейная система уравнения (6) описывает движение лишь в предположении малых отклонений от заданного программного движения.

Синтез алгоритма управления по траектории

Зададим траекторию квадрокоптера четырьмя параметрами — тремя координатами положения квадрокоптера и углом поворота относительно вертикальной оси (углы тангажа и крена будут определяться автоматически): $[\mathbf{r}_T(t) \ \psi_T(t)] = [x_T(t) \ y_T(t) \ z_T(t) \ \psi_T(t)]$.

Для управления траекторией квадрокоптера будем использовать ПД регулятор.

Рассмотрим алгоритм управления траекторией квадрокоптера. Определим ошибку по положению и по скорости как $\mathbf{e}_p = \mathbf{r} - \mathbf{r}_T$, $\mathbf{e}_v = \dot{\mathbf{r}} - \dot{\mathbf{r}}_T$. Программное (желаемое на текущий момент) ускорение будем рассчитывать на основе обратных связей ПД регулятора по положению и по скорости:

$$\ddot{\mathbf{r}}_d = \ddot{\mathbf{r}}_T - \mathbf{K}_p \mathbf{e}_p - \mathbf{K}_d \mathbf{e}_v, \quad (7)$$

где $\mathbf{K}_p$ и $\mathbf{K}_d$ — положительно определенные матрицы усиления.

Имея проекции программного ускорения (7) и используя линеаризованную систему (6), можем получить программные углы крена и тангажа (программный угол рыскания зададим равным ψ_T):

$$\begin{cases} \varphi_d = (1/g)(\ddot{x}_d s_{\psi_T} - \ddot{y}_d c_{\psi_T}); \\ \theta_d = (1/g)(\ddot{x}_d c_{\psi_T} + \ddot{y}_d s_{\psi_T}); \\ \psi_d = \psi_T. \end{cases} \quad (8)$$

Используя систему уравнений (3) и обратные связи по углам φ и θ , рассчитаем u_1 — проекцию равнодействующей подъемной силы на ось Z_B ПСК:

$$u_1 = m(\ddot{z}_d + g)/c_{\varphi} c_{\theta}. \quad (9)$$

Для стабилизации углов $[\varphi_d \ \theta_d \ \psi_d]$ относительно программного состояния и расчета $[u_2 \ u_3 \ u_4]$ будем также использовать ПД регулятор, в отличие от работы [8], где использовался АКОР (аналитически сконструированный оптимальный регулятор). Мотивом данного изменения явилась необходимость ухода от вычитания углов и от возможно возникающей в результате этого сингулярности. Теперь ошибка по угловой ориентации базируется на основе матрицы поворота:

$$\mathbf{e}_R = 1/2(\mathbf{R}_d^T \mathbf{R} - \mathbf{R}^T \mathbf{R}_d)^{\vee},$$

где $\mathbf{R}_d$ — матрица поворота, рассчитанная на основе программных углов (8); $\mathbf{R}$ — матрица поворота, рассчитанная на основе обратных связей по текущим углам $[\varphi \ \theta \ \psi]$; $^{\vee}$ — означает перевод элементов $\mathbf{SO}(3)$ в $\mathbb{R}^3$.

Ошибка по угловой скорости определяется как $\mathbf{e}_{\Omega} = \boldsymbol{\Omega} - \boldsymbol{\Omega}_T$.

Таким образом, три оставшиеся управляющих сигнала (моменты) рассчитываются следующим образом:

$$\begin{aligned} [u_2 \ u_3 \ u_4]^T = \\ = -\mathbf{K}_R \mathbf{e}_R - \mathbf{K}_\Omega \mathbf{e}_\Omega, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\mathbf{K}_R$ и $\mathbf{K}_\Omega$ — диагональные матрицы усиления.

Следовательно, управление $\mathbf{u}$, обеспечивающее выполнение заданной траектории, определяется на основе формул (9) и (10). Схема управления представлена на рис. 2.

Компьютерная апробация алгоритма управления по траектории

Для апробации алгоритма управления квадрокоптером по траектории использовалась связка (рис. 3) программных пакетов MATLAB и Universal Mechansim (UM) [14]. Для разработки модели системы управления использовался пакет MATLAB, и была установлена двухсторонняя связь MATLAB с UM для осуществления динамического и кинематического моделирования. Данные по массинерционным характеристикам квадрокоптера были введены в UM.

Для компьютерного моделирования использовали квадрокоптер со следующими массинерционными и геометрическими характеристиками:

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 0,002352 & 0 & 0 \\ 0 & 0,002352 & 0 \\ 0 & 0 & 0,004704 \end{bmatrix},$$

$$m = 0,32 \text{ кг}, L = 0,209 \text{ м}.$$

Как уже было отмечено ранее, модель системы управления построена в MATLAB, и управляющие сигналы рассчитываются на основе формул (9) и (10). Матрицы усиления имеют следующий вид:

$$\mathbf{K}_p = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_d = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K}_R = \begin{bmatrix} 20 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 20 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_\Omega = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \end{bmatrix}.$$

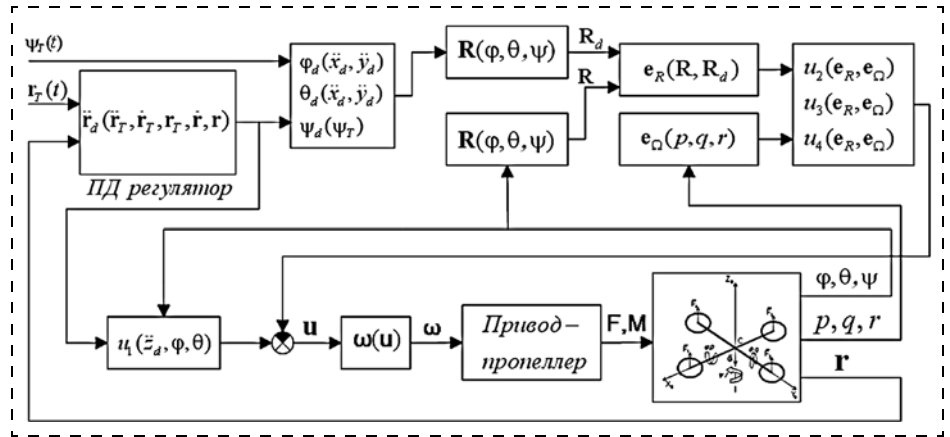


Рис. 2. Схема управления

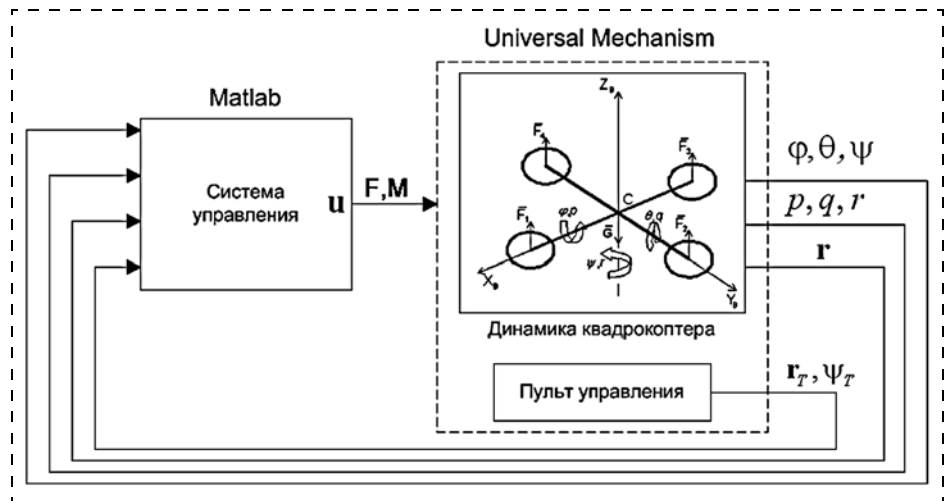


Рис. 3. Схема подключения "MATLAB" и "Universal Mechanism"

Теперь рассмотрим результаты моделирования движения квадрокоптера и апробации системы управления на следующих двух примерах:

1. Движение по точкам.

С помощью пульта управления была задана следующая траектория движения (начальные условия — нулевые):

$$[\mathbf{r}_T(t), \psi_T(t)] = \begin{cases} [1, 1, 3, 0], & \text{где } t \in [0; 6]; \\ [2, -1, 1, 0], & \text{где } t \in (6; 100]. \end{cases}$$

Результаты моделирования представлены на рис. 4.

2. Движение по окружности, расположенной под 45° относительно горизонтальной плоскости.

С помощью пульта управления была задана следующая траектория движения (начальные условия — нулевые):

$$\begin{cases} x_T(t) = 5\sin(0,628t); \\ y_T(t) = 5\cos(0,628t) + 5; \\ z_T(t) = 5\cos(0,628t) + 5; \\ \psi_T(t) = 0. \end{cases}$$

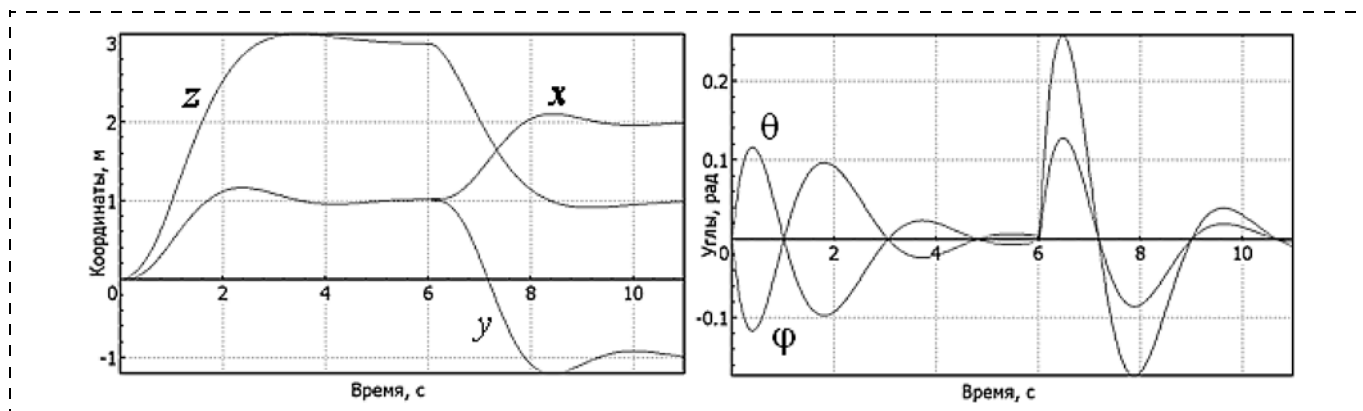


Рис. 4. Выполнение траектории: движение в точку (смотри видео [15])

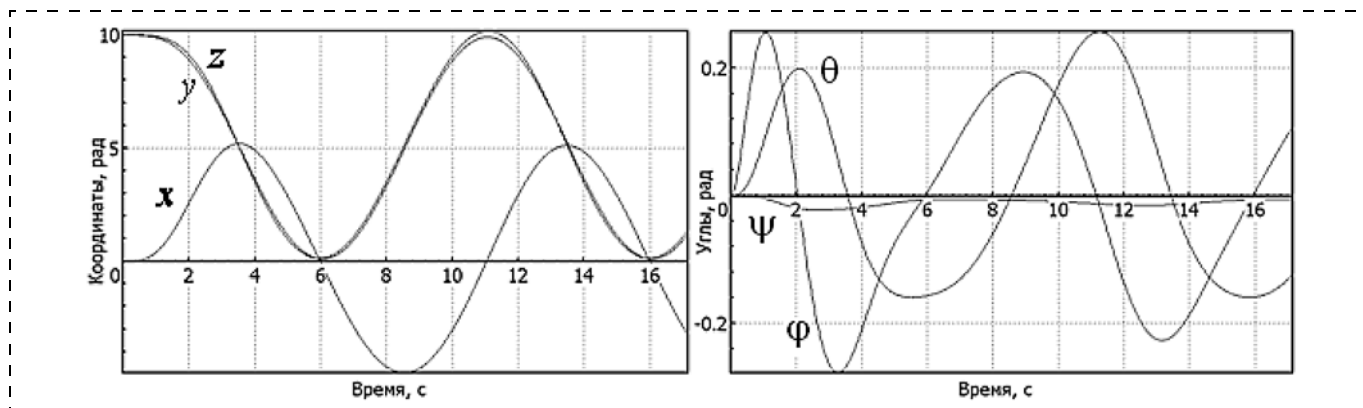


Рис. 5. Выполнение траектории: окружность под наклоном

Результаты моделирования представлены на рис. 5.

Заключение

В работе получена динамическая модель движения квадрокоптера, проведена ее линеаризация в окрестности программной траектории. Решена задача управления движением по траектории. С помощью компьютерного моделирования верифицирована работоспособность алгоритма управления движением квадрокоптера.

В дальнейшем планируется разработать алгоритм управления группой квадрокоптеров.

Список литературы

1. Cutler M., How J. P. Actuator Constrained Trajectory Generation and Control for Variable-Pitch Quadrotors // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference (GNC). Minneapolis, Minnesota, August 2012.
2. Lee T., Leok M., McClamroch N. H. "Geometric Tracking Control of a Quadrotor UAV on SE(3). <http://acl.mit.edu/papers/2012-uber-conference-submitted.pdf> // 49th IEEE Conference on Decision and Control. 2011.
3. Mellinger D., Kumar V. Minimum Snap Trajectory Generation and Control for Quadrotors. <http://acl.mit.edu/papers/2012-uber-conference-submitted.pdf>. GRASP Lab., University of Pennsylvania, 2011.

4. Kushleyev A., Mellinger D., Kumar V. Towards A Swarm of Agile Micro Quadrotors. GRASP Lab., University of Pennsylvania, 2013.
5. Thorhallur T. B., Dagur Gretarsson. Construction of a Four Rotor Helicopter Control System // S.M. Thesis. Technical University of Denmark, February 2009.
6. Hoffman G. M., Huang H., Waslander S. L., Tomlin C. J. Quadcopter Helicopter Flight Dynamics and Control: Theory and Experiment // AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, August 2007, Hilton Head, South Carolina.
7. Hong S. K. Fuzzy logic based closed-loop strap down attitude system for unmanned aerial vehicle (UAV). Department of Aerospace Engineering, Sejong University, 2005.
8. Зенкевич С. Л., Галустьян Н. К. Разработка математической модели и синтез алгоритма угловой стабилизации движения квадрокоптера // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 3. С. 27—32.
9. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Основы управления манипуляционными роботами. М.: Изд-во МГТУ, 2004.
10. Голубев Ю. Ф. Основы теоретической механики. М.: Изд-во МГУ, 2000.
11. Иванов В. А., Медведев В. С. Математические основы теории оптимального и логического управления. М.: Изд-во МГТУ, 2011.
12. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления, 4-е изд., СПб.: Профессия, 2007.
13. Белоконов С. А., Золотухин Ю. Н., Мальцев А. С., Нестеров А. А., Филиппов М. Н. Управление параметрами полета квадрокоптера при движении по заданной траектории // Автоматрия. 2012. № 5. С. 32—41.
14. Universal Mechanism — the software for modeling of dynamics // <http://www.universalmechanism.com>
15. URL: <http://youtube/wpBJCMI5GPM>

Algorithm for Quadcopter Trajectory Control and Flight Modeling

S. L. Zenkevich, zenkev@bmstu.ru, **N. K. Galustyan**, narekgalustyan@gmail.com ✉,
Robotics Training-Research Center, Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: **Galustyan Narek K.**, Ph. D., Robotics Training-Research Center,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation,
e-mail: narekgalustyan@gmail.com

Received on March 14, 2015

Accepted April 03, 2015

In this article the authors propose a trajectory control algorithm for an unmanned aerial vehicle (UAV), which is lifted and propelled by four rotors. The first step in designing of the above mentioned trajectory controller was development of a quadcopter flight dynamic (math) model and its further linearization. The math model was based on Newton and Euler equation of motion. The next step was designing of a quadcopter attitude control on the grounds of a linearized dynamic model and angular PD regulator. Then the authors were able to elaborate a trajectory control algorithm by using PD regulator for a trajectory error minimization. Finally, in order to verify the control algorithm the authors built a control system model in Matlab, designed a dynamic model in Universal Mechanism for flight simulation and conducted several experiments. The key idea of the developed trajectory control algorithm is that the control inputs are forces and momentums applied to a quadcopter, as dynamics of the motor and propeller pairs are essentially faster compared to the rigid body dynamics. One of the major objectives in the attitude control design was to avoid the angels' subtractions in order to prevent singularities. For this reason the authors used rotation matrix error and PD regulator instead of Linear Quadratic Regulator. A set of experiments in the Universal Mechanism and Matlab proved the efficiency of the developed trajectory control algorithm. The paper also presents the modeling details and experiment results.

Keywords: quadcopter, math model, dynamics, attitude control, trajectory control, PD regulator, modeling, matlab, universal mechanism

For citation:

Zenkevich S. L., Galustyan N. K., Algorithm for Quadcopter Trajectory Control and Flight Modeling, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol.16, no.8, pp. 530—535.

DOI: 10.17587/mau.16.530-535

References

1. **Cutler M., How J. P.** Actuator Constrained Trajectory Generation and Control for Variable-Pitch Quadrotors", *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference (GNC)*, Minneapolis, Minnesota, August 2012.
2. **Lee T., Leok M., McClamroch N. H.** Geometric Tracking Control of a Quadrotor UAV on SE(3), *49th IEEE Conference on Decision and Control*, 2011.
3. **Mellinger D., Kumar V.** Minimum Snap Trajectory Generation and Control for Quadrotors, GRASP Lab, University of Pennsylvania, 2011.
4. **Kushleyev A., Mellinger D., Kumar V.** Towards A Swarm of Agile Micro Quadrotors, GRASP Lab, University of Pennsylvania, 2013.
5. **Thorhallur Tomas Buchholz, Dagur Gretarsson.** Construction of a Four Rotor Helicopter Control System, *S. M. Thesis*, Technical University of Denmark, February 2009.
6. **Hoffman G. M., Huang H., Waslander S. L., Tomlin C. J.** Quadcopter Helicopter Flight Dynamics and Control: Theory and Experiment, *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, August 2007, Hilton Head, South Carolina.
7. **Hong S. K.** Fuzzy logic based closed-loop strap down attitude system for unmanned aerial vehicle (UAV), Department of Aerospace Engineering, Sejong University, 2005.
8. **Zenkevich S. L., Galustyan N.** *Razrabotka matematicheskoy modeli i sintez algoritma uglovoj stabilizatsii dvizheniya kvadrokoptera* (Angel Stabilization and Flight Modeling of a Quadcopter), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 3, pp. 27—32 (in Russian).
9. **Zenkevich S. L., Yuschenko A.** *Osnovy upravleniya manipulyatsionnymi robotami* (Manipulator control basics), Moscow, Publishing House of BMSTU, 2004 (in Russian).
10. **Golubev Ju.** *Osnovy teoreticheskoy mehaniki* (Basics of theoretical mechanics), Moscow, Publishing House of MSU, 2000 (in Russian).
11. **Ivanov V., Medvedev V.** *Matematicheskie osnovy teorii optimal'nogo i logicheskogo upravleniya* (Mathematical basics of optimal and logic control theory), Moscow, Publishing House of BMSTU, 2011 (in Russian).
12. **Besekerskiy V. A., Popov E. P.** *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* (Theory of autonomous control), SPb, Proffesija, 2007 (in Russian).
13. **Belokon' S. A., Zolotuhin Ju. N., Mal'cev A. S., Nesterov A. A., Filippov M. N.** *Upravlenie parametrami poljota kvadrokoptera pri dvizhenii po zadannoj traektorii* (Control of flight main parameters in case of trajectory control), 2012, no. 5, pp. 32—41 (in Russian).
14. **Universal Mechanism** — the software for modeling of dynamics, available at: <http://www.universalmechanism.com>
15. **URL:** <http://youtube/wpBJCMI5GPM>

Я. Г. Сапунков, канд. физ.-мат. наук, доц.,
А. В. Молоденков, канд. техн. наук, ст. науч. сотр, iptmuran@san.ru,
Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов

Алгоритм оптимального по энергии разворота космического аппарата при произвольных граничных условиях*

Рассматривается задача оптимального в смысле минимума энергетических затрат разворота космического аппарата как твердого тела произвольной динамической конфигурации, без ограничения на функцию управления при произвольных граничных условиях. В классе обобщенных конических движений проведена модификация задачи оптимального разворота, которая позволила получить аналитическое решение. Дается алгоритм оптимального разворота космического аппарата. Приводятся числовые примеры, показывающие, что решения модифицированной задачи хорошо аппроксимируют решение классической задачи оптимального разворота космического аппарата.

Ключевые слова: оптимальное управление, космический аппарат, твердое тело, обобщенное коническое движение, произвольные граничные условия

Введение

Построение управления пространственной переориентацией космического аппарата (КА) как твердого тела в традиционной постановке включает решение задач программного углового движения (разворота), программного управления и поиска управления, стабилизирующего программу углового движения в малом. Задача расчета программного углового движения и реализующего его управления во многих случаях решается с помощью методов теории оптимального управления. Аналитическое решение этой задачи для наиболее часто используемых функционалов оптимизации при произвольных граничных условиях по угловому положению и угловой скорости КА не найдено даже в случае сферической симметрии КА, не говоря уже о его произвольной динамической конфигурации. Известны лишь некоторые частные случаи решения задачи (например, [1–8]); в общем случае приходится рассчитывать только на приближенные численные методы. Между тем, аналитическое решение задачи оптимального разворота КА (твердого тела) в замкнутой форме имеет не только теоретический, но и большой практический интерес, так как позволяет использовать на борту КА готовые законы программного управления и изменения оптимальной траектории.

В данной статье (в разделах 1–3) в традиционной постановке рассматривается задача оптимального в смысле минимума энергозатрат разворота КА как твердого тела произвольной динамической конфигурации при произвольных граничных условиях по угловому положению и угловой скорости КА без ограничения на функцию управления. С применением кватернионов на основании принципа максимума Л. С. Понтрягина получены выражения для структуры оптимального управления, функции Гамильтона—Понтрягина и сопряженной системы

уравнений для исходной задачи. В разделах 4, 5 статьи представлено аналитическое решение модифицированной задачи оптимального по энергии разворота КА при произвольных граничных условиях по угловому положению и угловой скорости КА, доведенное до алгоритма. В классе обобщенных конических движений проведена модификация классической задачи оптимального разворота, которая позволила получить аналитические решения для уравнений движения, содержащие произвольные постоянные и две произвольные скалярные функции (параметры обобщенного конического движения). Относительно этих функций и их производных формулируется и решается оптимизационная задача с квадратичным функционалом, в которой в качестве управлений выступают вторые производные от этих двух функций. Найденное аналитическое решение модифицированной задачи может рассматриваться как приближенное решение классической задачи оптимального разворота КА при произвольных граничных условиях. Получены явные выражения для вектора угловой скорости, управляющего момента и траектории движения КА. Следует отметить, что для случаев аналитической разрешимости традиционной задачи оптимального разворота при сферической симметрии КА, когда наложены ограничения на крайевые условия задачи (плоский эйлеров разворот, коническое движение), решения традиционной и модифицированной задач полностью совпадают. В разделе 6 приводятся краткое описание процедуры численного решения традиционной задачи, ранее полученного в работах [9, 10], и численные примеры, показывающие близость решений традиционной и модифицированной задач оптимального разворота произвольного КА при произвольных граничных условиях. Отметим, что среди примеров рассматриваются развороты Международной космической станции (МКС) и КА "Спейс Шаттл".

Статья продолжает исследования, начатые в работах [10, 11].

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-01-00165).

1. Постановка традиционной задачи

Движение КА как твердого тела произвольной динамической конфигурации вокруг центра масс описывается уравнениями [2]

$$2\dot{\Lambda} = \Lambda \circ \omega, \quad (1.1)$$

$$\dot{\omega} = \Gamma^{-1}M - \Gamma^{-1}[\omega, I\omega], \quad (1.2)$$

где $\Lambda(t) = \lambda_0(t) + \lambda_1(t)i_1 + \lambda_2(t)i_2 + \lambda_3(t)i_3$ — кватернион поворота КА; $\omega(t) = \omega_1(t)i_1 + \omega_2(t)i_2 + \omega_3(t)i_3$ — вектор угловой скорости; $M(t) = [M_1(t), M_2(t), M_3(t)]^T$ — вектор внешнего момента, действующего на КА; матрица

$$I = \begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 \end{bmatrix}$$

— тензор инерции. Фазовые координаты Λ , ω и управление M удовлетворяют требованиям задачи оптимального управления [12] ($\Lambda(t)$, $\omega(t)$ — непрерывные функции, $M(t)$ — кусочно-непрерывная функция); кватернион $\Lambda(t)$ нормирован, т. е. $\|\Lambda\| = \lambda_0^2 + \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 = 1$; i_1, i_2, i_3 — орты гиперкомплексного пространства (мнимые единицы Гамильтона), которые можно идентифицировать с оортами трехмерного векторного пространства i_1, i_2, i_3 ; символ "o" означает кватернионное умножение, а $[\cdot, \cdot]$ — векторное произведение. В динамических уравнениях Эйлера (1.2) I_1, I_2, I_3 — главные моменты инерции КА (твердого тела).

Заданы произвольные граничные условия по угловому положению

$$\Lambda(0) = \Lambda_0, \Lambda(T) = \Lambda_T \quad (1.3)$$

и угловой скорости КА

$$\omega(0) = \omega_0, \omega(T) = \omega_T. \quad (1.4)$$

Требуется определить оптимальное управление $M^{\text{опт}}(t)$ системой (1.1), (1.2) при граничных условиях (1.3), (1.4), доставляющее минимум функционалу

$$J = \int_0^T (M_1^2 + M_2^2 + M_3^2) dt, \quad (1.5)$$

где время T произвольно и зафиксировано.

2. Переход к безразмерным переменным

Перейдем от размерных переменных задачи к безразмерным по формулам

$$I^{\text{масш}} = ((I_1^2 + I_2^2 + I_3^2)/3)^{1/2}, I_k^{\text{безраз}} = I_k/I^{\text{масш}}, \\ k = 1, 2, 3;$$

$$\omega^{\text{безраз}} = T\omega, t^{\text{безраз}} = T^{-1}t, \\ M^{\text{безраз}} = (I^{\text{масш}})^{-1}T^2M, J^{\text{безраз}} = (I^{\text{масш}})^{-2}T^3J,$$

при этом вид формул (1.1)—(1.4) не изменится, а функционал (1.5) запишется следующим образом:

$$J = \int_0^1 (M_1^2 + M_2^2 + M_3^2) dt. \quad (2.1)$$

Далее будем иметь в виду постановку задачи (1.1)—(1.4) (где $T = 1$), (2.1) в безразмерных переменных, и верхние индексы у них будут опущены.

3. Применение принципа максимума

Выполним процедуру принципа максимума Л. С. Понтрягина [1, 12]. Введем вспомогательные функции $\Psi(t)$ (кватернион) и $\phi(t)$ (вектор), сопряженные к фазовым переменным $\Lambda(t)$, $\omega(t)$. Составим функцию Гамильтона—Понтрягина

$$H = -\psi^*(M, M) + (\Psi, \Lambda \circ \omega)/2 + \\ + (\phi, \Gamma^{-1}M - \Gamma^{-1}[\omega, I\omega]), \quad (3.1)$$

где постоянная $\psi^* \geq 0$, а $(\cdot, \cdot)$ — скалярное произведение векторов.

Будем рассматривать невырожденные решения краевой задачи принципа максимума, для которых $\psi^* > 0$. В силу однородности функции Гамильтона—Понтрягина H [12] в формуле (3.1) положим $\psi^* = 1$.

Сопряженная система имеет вид

$$\begin{cases} 2\dot{\Psi} = \Psi \circ \omega; \\ \dot{\phi} = -\text{vect}(\tilde{\Lambda} \circ \Psi)/2 - [\Gamma^{-1}\phi, I\omega] + I[\Gamma^{-1}\phi, \omega], \end{cases} \quad (3.2)$$

где $\text{vect}(\cdot)$ обозначает векторную часть кватерниона, а $\tilde{\cdot}$ — сопряжение кватерниона. Как видно, уравнения для переменных Ψ и Λ совпадают, а их решения различаются на кватернионную мультипликативную константу C :

$$\Psi = C \circ \Lambda. \quad (3.3)$$

Используя этот эффект и введя обозначение [1]

$$p = \text{vect}(\tilde{\Lambda} \circ \Psi) = \tilde{\Lambda} \circ c_v \circ \Lambda, \quad (3.4)$$

сопряженную систему (3.2) запишем в виде

$$\begin{cases} p = \tilde{\Lambda} \circ c_v \circ \Lambda; \\ \dot{\phi} = -p/2 - [\Gamma^{-1}\phi, I\omega] + I[\Gamma^{-1}\phi, \omega]. \end{cases} \quad (3.5)$$

Следует отметить, что применение этого приема [1], основанного на самосопряженности дифференциальной кватернионной системы уравнений (1.1) (замена кватернионной сопряженной переменной Ψ на векторную переменную p (3.4)) позволяет понизить размерность краевой задачи, получаемой после применения принципа максимума, на четыре.

Условие максимума функции Гамильтона—Понтрягина (3.1) дает следующую структуру оптимального управления:

$$\mathbf{M}^{\text{опт}} = \mathbf{I}^{-1}\boldsymbol{\Phi}/2. \quad (3.6)$$

Как видно, вектор-функция управления в задаче носит непрерывный характер.

Функция Гамильтона—Понтрягина (3.1) с учетом новой переменной $\mathbf{p}$ (3.4) примет вид

$$H = -(\mathbf{M}, \mathbf{M}) + (\mathbf{p}, \boldsymbol{\omega})/2 + (\boldsymbol{\Phi}, \mathbf{I}^{-1}\mathbf{M} - \mathbf{I}^{-1}[\boldsymbol{\omega}, \mathbf{I}\boldsymbol{\omega}]). \quad (3.7)$$

4. Модифицированная задача оптимального разворота КА

Движение КА по-прежнему описывается соотношениями (1.1)—(1.4), при этом начальное и конечное значения по угловому положению и угловой скорости КА произвольны.

Одной из основных проблем при построении аналитического решения в задаче оптимального разворота твердого тела (КА) является разрешимость классической задачи Дарбу — аналитического определения $\Lambda(t)$ из уравнения (1.1) при известных $\Lambda_0, \boldsymbol{\omega}(t)$.

Для кватернионного дифференциального уравнения (1.1) при условии, что вектор угловой скорости $\boldsymbol{\omega}(t)$ задается выражением

$$\boldsymbol{\omega}(t) = \mathbf{i}_1 \frac{df}{dt} \sin g(t) + \mathbf{i}_2 \frac{df}{dt} \cos g(t) + \mathbf{i}_3 \frac{df}{dt}, \quad (4.1)$$

в котором $f(t)$ и $g(t)$ — произвольные функции времени, известно решение [13], удовлетворяющее начальному условию (1.3):

$$\Lambda(t) = \Lambda_0 \circ \exp\{-\mathbf{i}_3 g(0)/2\} \circ \exp\{-\mathbf{i}_2 f(0)/2\} \circ \exp\{\mathbf{i}_2 f(t)/2\} \circ \exp\{\mathbf{i}_3 g(t)/2\}, \quad (4.2)$$

где символ $\exp\{\cdot\}$ обозначает кватернионную экспоненту [1]. Формулы (4.1), (4.2) включают в себя все известные точные аналитические решения традиционной задачи оптимального разворота КА при его сферической симметрии, когда вектор угловой скорости на всем интервале времени движения КА постоянен по направлению или описывает в пространстве круговой конус [1—3, 5—8, 11].

Выражение (4.1) и решение (4.2) можно обобщить, добавив поворот на постоянный угол вокруг некоторой оси. Такой поворот задается с помощью кватерниона $\mathbf{K}$, $\|\mathbf{K}\| = 1$. Тогда вектор $\boldsymbol{\omega}$ и кватернион Λ будут определяться соотношениями

$$\boldsymbol{\omega} = \tilde{\mathbf{K}} \circ \left(\mathbf{i}_1 \frac{df}{dt} \sin g(t) + \mathbf{i}_2 \frac{df}{dt} \cos g(t) + \mathbf{i}_3 \frac{dg}{dt} \right) \circ \mathbf{K}; \quad (4.3)$$

$$\Lambda = \Lambda_0 \circ \tilde{\mathbf{K}} \circ \exp\{-\mathbf{i}_3 g(0)/2\} \circ \exp\{\mathbf{i}_2 (f(t) - f(0))/2\} \circ \exp\{\mathbf{i}_3 g(t)/2\} \circ \mathbf{K}. \quad (4.4)$$

Будем рассматривать вторые производные от функций f и g в качестве управляющих параметров. Тогда, если ввести обозначения

$$\frac{df}{dt} = f_1, \quad \frac{dg}{dt} = g_1, \quad (4.5)$$

то можно составить систему дифференциальных уравнений, описывающих управляемую систему:

$$\frac{df}{dt} = f_1, \quad \frac{dg}{dt} = g_1, \quad \frac{df_1}{dt} = u_1, \quad \frac{dg_1}{dt} = u_2, \quad (4.6)$$

где f, f_1, g, g_1 — фазовые координаты; u_1, u_2 — управляющие параметры.

Ограничимся случаем, когда кватернион $\mathbf{K}$ представляется в виде произведения:

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_2 \circ \mathbf{K}_1, \quad \mathbf{K}_1 = \exp\{-\mathbf{i}_1 \alpha_1/2\}, \quad \mathbf{K}_2 = \exp\{-\mathbf{i}_2 \alpha_2/2\}, \quad (4.7)$$

где α_1, α_2 — некоторые постоянные. Отметим, что кватернионы $\mathbf{K}_1$ и $\mathbf{K}_2$ определяют поворот вектора $\boldsymbol{\omega}$ (4.1) вокруг осей $\mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2$. Поворот вокруг оси $\mathbf{i}_3$ уже включен в формулу (4.3), если учесть, что в функцию $g(t)$ входит аддитивная постоянная. Сопряженный кватернион $\tilde{\mathbf{K}}$ будет представляться следующим образом:

$$\tilde{\mathbf{K}} = \tilde{\mathbf{K}}_1 \circ \tilde{\mathbf{K}}_2, \quad \tilde{\mathbf{K}}_1 = \exp\{-\mathbf{i}_1 \alpha_1/2\}, \quad \tilde{\mathbf{K}}_2 = \exp\{-\mathbf{i}_2 \alpha_2/2\}. \quad (4.8)$$

Условия того, что выражения для $\boldsymbol{\omega}, \Lambda$ (4.3), (4.4) удовлетворяют граничным условиям (1.3), (1.4), с учетом (4.7), (4.8) запишутся в виде

$$\tilde{\mathbf{K}}_1 \circ \tilde{\mathbf{K}}_2 \circ (\mathbf{i}_1 f_1(0) \sin g(0) + \mathbf{i}_2 f_1(0) \cos g(0) + \mathbf{i}_3 g_1(0)) \circ \mathbf{K}_2 \circ \mathbf{K}_1 = \boldsymbol{\omega}_0; \quad (4.9)$$

$$\tilde{\mathbf{K}}_1 \circ \tilde{\mathbf{K}}_2 \circ (\mathbf{i}_1 f_1(T) \sin g(T) + \mathbf{i}_2 f_1(T) \cos g(T) + \mathbf{i}_3 g_1(T)) \circ \mathbf{K}_2 \circ \mathbf{K}_1 = \boldsymbol{\omega}_T; \quad (4.10)$$

$$\Lambda_0 \circ \tilde{\mathbf{K}}_1 \circ \tilde{\mathbf{K}}_2 \circ \exp\{-\mathbf{i}_3 g(0)/2\} \circ \exp\{\mathbf{i}_2 (f(T) - f(0))/2\} \circ \exp\{\mathbf{i}_3 g(T)/2\} \circ \mathbf{K}_2 \circ \mathbf{K}_1 = \Lambda_T. \quad (4.11)$$

Тогда для управляемой системы (4.6) можно сформулировать следующую задачу оптимального управления. Требуется найти оптимальные управления $u_1(t), u_2(t)$, которые переводят управляемую систему (4.6) из начального состояния

$$f = f(0), f_1 = f_1(0), g = g(0), g_1 = g_1(0) \quad (4.12)$$

в конечное состояние

$$f = f(T), f_1 = f_1(T), g = g(T), g_1 = g_1(T), \quad (4.13)$$

удовлетворяющие соотношениям (4.9)—(4.11), в которых α_1, α_2 выступают как параметры, подлежащие определению, и доставляют минимум функционалу

$$J = \int_0^T (u_1^2 + u_2^2) dt. \quad (4.14)$$

Соотношения (4.9)—(4.11) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} & \mathbf{i}_1 f_1(0) \text{sing}(0) + \mathbf{i}_2 f_1(0) \text{cosg}(0) + \mathbf{i}_3 g_1(0) = \\ & = \mathbf{K}_2 \circ \mathbf{K}_1 \circ \omega_0 \circ \tilde{\mathbf{K}}_1 \circ \tilde{\mathbf{K}}_2; \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{i}_1 f_1(T) \text{sing}(T) + \mathbf{i}_2 f_1(T) \text{cosg}(T) + \mathbf{i}_3 g_1(T) = \\ & = \mathbf{K}_2 \circ \mathbf{K}_1 \circ \omega_T \circ \tilde{\mathbf{K}}_1 \circ \tilde{\mathbf{K}}_2; \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} & \exp\{-\mathbf{i}_3 g(0)/2\} \circ \exp\{\mathbf{i}_2(f(T) - f(0))/2\} \circ \\ & \circ \exp\{\mathbf{i}_3 g(T)/2\} = \mathbf{K}_2 \circ \mathbf{K}_1 \circ \tilde{\Lambda}_0 \circ \Lambda_T \circ \tilde{\mathbf{K}}_1 \circ \tilde{\mathbf{K}}_2. \end{aligned} \quad (4.17)$$

Такую задачу оптимального управления будем называть модифицированной задачей оптимального разворота КА.

Управляющий момент, соответствующий решению модифицированной задачи оптимального разворота КА, определяется из (1.2) по формуле

$$\mathbf{M} = \mathbf{I} \dot{\omega} + [\omega, \mathbf{I} \omega]. \quad (4.18)$$

5. Решение задачи с помощью принципа максимума

Функция Гамильтона—Понтрягина для поставленной задачи оптимального управления имеет вид

$$H = -(u_1^2 + u_2^2) + \psi_1 f_1 + \psi_2 g_1 + \psi_3 u_1 + \psi_4 u_2, \quad (5.1)$$

где $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$ — сопряженные переменные, удовлетворяющие системе уравнений

$$\frac{d\psi_1}{dt} = 0, \quad \frac{d\psi_2}{dt} = 0, \quad \frac{d\psi_3}{dt} = -\psi_1, \quad \frac{d\psi_4}{dt} = -\psi_2. \quad (5.2)$$

Общее решение уравнений (5.2), содержащее произвольные постоянные $c_1, \dots, c_4$, имеет вид

$$\psi_1 = c_1, \quad \psi_2 = c_2, \quad \psi_3 = -c_1 t + c_3, \quad \psi_4 = -c_2 t + c_4. \quad (5.3)$$

Из условия максимума для функции Гамильтона—Понтрягина (5.1) определяется оптимальное управление

$$\begin{aligned} u_1 &= \psi_3/2 = (-c_1 t + c_3)/2, \\ u_2 &= \psi_4/2 = (-c_2 t + c_4)/2. \end{aligned} \quad (5.4)$$

После подстановки (5.4) в систему уравнений (4.6) находится общее решение для фазовых координат, содержащее восемь произвольных постоянных $c_1, \dots, c_8$:

$$\begin{aligned} f &= -c_1 t^3/12 + c_3 t^2/4 + c_5 t + c_6; \\ g &= -c_2 t^3/12 + c_4 t^2/4 + c_7 t + c_8; \\ f_1 &= -c_1 t^2/4 + c_3 t/2 + c_5; \\ g_1 &= -c_2 t^2/4 + c_4 t/2 + c_7. \end{aligned} \quad (5.5)$$

В связи с тем, что c_6 входит в функцию f как аддитивная постоянная, то из формул (4.4) видно, что эта постоянная не оказывает влияние; поэтому c_6 можно положить равной нулю. Таким образом, для определения девяти неизвестных постоянных задачи $c_1, \dots, c_5, c_7, c_8$ и α_1, α_2 служат девять уравнений из системы (4.15)—(4.17) (отметим, что в кватернионном уравнении (4.17) независимыми являются только три уравнения в скалярной форме из-за нормированности кватерниона Λ). Если формулы (5.5) подставить в (4.3), (4.4), то будут получены аналитические выражения для определения законов изменения оптимальной угловой скорости и оптимальной траектории твердого тела. Эти выражения определяют оптимальный в смысле минимума функционала энергозатрат (4.14) разворот КА в классе обобщенных конических движений. Управляющий момент согласно (4.1), (4.18) имеет вид

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \mathbf{I} \dot{\omega} + [\omega, \mathbf{I} \omega] = \mathbf{I} (\tilde{\mathbf{K}} \circ ((\mathbf{i}_1(u_1 \text{sing} + f_1 g_1 \text{cosg}) + \\ & + \mathbf{i}_2(u_1 \text{cosg} - f_1 g_1 \text{sing}) + \mathbf{i}_3 u_2) \circ \mathbf{K}) + \\ & + [\tilde{\mathbf{K}} \circ (\mathbf{i}_1 f_1 \text{sing} + \mathbf{i}_2 f_1 \text{cosg} + \mathbf{i}_3 g_1) \circ \\ & \circ \mathbf{K}, \mathbf{I} (\tilde{\mathbf{K}} \circ (\mathbf{i}_1 f_1 \text{sing} + \mathbf{i}_2 f_1 \text{cosg} + \mathbf{i}_3 g_1) \circ \mathbf{K})]. \end{aligned} \quad (5.6)$$

Формула (5.6) с учетом (5.4), (5.5) определяет аналитическое решение для управляющего момента, соответствующего решению модифицированной задачи. Модифицированная задача оптимального разворота КА тем самым решена полностью.

Следует отметить, что при сферической симметрии КА квадрат модуля управляющего момента выражается через управляющие параметры и фазовые координаты модифицированной задачи следующим образом:

$$\mathbf{M}^2 = u_1^2 + f_1^2 g_1^2 + u_2^2. \quad (5.7)$$

Если в задаче оптимального разворота сферически-симметричного КА векторы граничных условий по угловой скорости ω_0, ω_T положить параллельными $\text{vect}(\tilde{\Lambda}_0 \circ \Lambda_T)$ (плоский эйлеров разворот КА), то решения задач в классической и модифицированной постановках полностью совпадут. То же самое можно сказать и о случае, когда решение классической задачи оптимального разворота сферически-симметричного КА получено в классе конических движений типа решения [11]. В этих случаях слагаемое $f_1^2 g_1^2$ в (5.8) обращается в нуль, и функционал (4.14) полностью переходит в функционал (1.5) ((2.1)) классической задачи.

Приведем алгоритм решения задачи оптимального разворота КА (твердого тела) произвольной динамической конфигурации при произвольных граничных условиях в классе обобщенных конических движений в безразмерных переменных.

Шаг 1. По заданным граничным условиям по угловому положению Λ_0, Λ_T (1.3), угловой скорости

ω_0, ω_T (1.4) и времени переориентации КА ($T = 1$) из формул (4.7), (4.8) и девяти уравнений системы (4.15)–(4.17) определяются девять неизвестных постоянных задачи $c_1, \dots, c_5, c_7, c_8, \alpha_1, \alpha_2$ и строятся функции f, f_1, g, g_1 .

Шаг 2. Используя формулы (4.7), находим компоненты кватерниона $\mathbf{K}$.

Шаг 3. По формуле (4.3)

$$\omega = \tilde{\mathbf{K}} \circ \left(\mathbf{i}_1 \frac{df}{dt} \text{sing}(t) + \mathbf{i}_2 \frac{df}{dt} \text{cosg}(t) + \mathbf{i}_3 \frac{dg}{dt} \right) \circ \mathbf{K}$$

вычисляется вектор угловой скорости КА.

Шаг 4. По формуле (4.4)

$$\Lambda = \Lambda_0 \circ \tilde{\mathbf{K}} \circ \exp\{-\mathbf{i}_3 g(0)/2\} \circ \exp\{\mathbf{i}_2 (f(t) - f(0))/2\} \circ \exp\{\mathbf{i}_3 g(t)/2\} \circ \mathbf{K}$$

вычисляется кватернион ориентации КА.

Шаг 5. По формуле (5.6) вычисляется вектор управляющего момента КА.

6. Численные примеры

В данном разделе приводятся примеры численного решения задачи оптимального разворота КА в традиционной и модифицированной постановках для трех вариантов динамической конфигурации: сферической симметрии, МКС [14] и КА "Спейс Шаттл" [15].

Численное решение традиционной задачи оптимального разворота КА (1.1)–(1.4), (2.1) на основании принципа максимума Л. С. Понтрягина сводится к решению краевой задачи для системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} 2\dot{\Lambda} = \Lambda \circ \omega; \\ \dot{\omega} = \Gamma^{-1} \mathbf{M} - \Gamma^{-1} [\omega, \mathbf{I}\omega]; \\ \dot{\Phi} = -\mathbf{p}/2 - [\Gamma^{-1} \Phi, \mathbf{I}\omega] + \mathbf{I}[\Gamma^{-1} \Phi, \omega]; \\ \mathbf{p} = \tilde{\Lambda} \circ \mathbf{c}_v \circ \Lambda, \mathbf{c}_v = \text{const}, \end{cases} \quad (6.1)$$

$$\Lambda(0) = \Lambda_0, \omega(0) = \omega_0, \quad (6.2)$$

$$\Lambda(T) = \Lambda_T, \omega(T) = \omega_T, \quad (6.3)$$

$$\mathbf{M}^{\text{опт}} = \Gamma^{-1} \Phi/2, \quad (6.4)$$

откуда подлежат нахождению величины $\mathbf{M}^{\text{опт}}, T^{\text{опт}}, \Lambda^{\text{опт}}, \omega^{\text{опт}}, \mathbf{c}_v$.

Конечное условие (6.3) необходимо переписать в семимерном фазовом пространстве $\Lambda \times \omega$ в виде

$$\begin{aligned} \text{vect}(\Lambda(T) \circ \tilde{\Lambda}_T) &= 0, \\ \omega(T) &= \omega_T. \end{aligned} \quad (6.5)$$

Для решения краевой задачи (6.1), (6.2), (6.4), (6.5) разработан итерационный численный метод [9], представляющий собой комбинацию методов Рунге–Кутты, Ньютона и градиентного спуска. Важно отметить, что условие совпадения кватерниона ориентации КА в конечный момент времени с кватернионом, определяющим заданную конечную ориентацию КА, (условие (6.3)) заменено условием

обращения в нуль векторной части кватернионного произведения $\Lambda(T) \circ \tilde{\Lambda}_T$ (6.5). В [15, 16] авторы пытались выполнить условие $\Lambda(T) = \tilde{\Lambda}_T$, что приводило к вырождению матриц частных производных от невязок. В качестве первого приближения по недостающим начальным условиям при решении краевой задачи (6.1), (6.2), (6.4), (6.5) оптимального управления КА с произвольными граничными условиями по угловому положению и угловой скорости КА берутся начальные условия по переменным $\Phi, \mathbf{p}$, полученные при решении задачи оптимального разворота сферически симметричного КА в классе плоских эйлеровых разворотов [8].

Численное решение модифицированной задачи оптимального разворота КА было построено по формулам разделов 4, 5.

Во всех примерах расчеты проводили для граничных условий:

$$\begin{aligned} \Lambda_0 &= (0,7951, 0,2981, -0,3975, 0,3478); \\ \Lambda_T &= (0,8443, 0,3985, -0,3260, 0,1485); \\ \omega_0 &= (0,2739, -0,2388, -0,3); \omega_T = (0,0, 0,0, -0,59). \end{aligned} \quad (6.6)$$

Решения традиционной и модифицированной задачи оказались близкими. Для примера, в табл. 1–3 приведем значения компонент вектора $\mathbf{M}(t)$ на концах и в середине интервала времени движения КА $[0, T]$ ($T = 1$) в этих двух решениях.

Пример 1. $I_1 = I_2 = I_3 = 1$ (случай сферической симметрии КА). Значения постоянных $\alpha_1, \alpha_2, c_1, \dots, c_6, c_8$, входящих в аналитическое решение модифицированной задачи, таковы:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= -0,0421, \alpha_2 = -0,2226, c_1 = 3,2902, \\ c_2 &= -1,4885, c_3 = 2,2113, c_4 = -1,45, c_5 = -0,4156, \\ c_6 &= 0, c_7 = -0,2221, c_8 = -0,9216. \end{aligned}$$

Таблица 1

t	$M_1^{\text{традиц}}$	$M_2^{\text{традиц}}$	$M_3^{\text{традиц}}$	$M_1^{\text{модиф}}$	$M_2^{\text{модиф}}$	$M_3^{\text{модиф}}$
0	-0,9854	0,7259	-0,4892	-0,9647	0,7634	-0,4932
0,5	-0,2917	0,2087	-0,2878	-0,3103	0,1687	-0,2847
$T = 1$	0,5077	-0,1272	-0,0985	0,5350	-0,0220	-0,1024

Таблица 2

t	$M_1^{\text{традиц}}$	$M_2^{\text{традиц}}$	$M_3^{\text{традиц}}$	$M_1^{\text{модиф}}$	$M_2^{\text{модиф}}$	$M_3^{\text{модиф}}$
0	-0,2091	0,8349	-0,6241	-0,2182	0,9608	-0,6892
0,5	-0,0741	0,2697	-0,3795	-0,0725	0,1683	-0,3630
$T = 1$	0,1318	-0,2804	-0,1131	0,1261	-0,0253	-0,1307

Таблица 3

t	$M_1^{\text{традиц}}$	$M_2^{\text{традиц}}$	$M_3^{\text{традиц}}$	$M_1^{\text{модиф}}$	$M_2^{\text{модиф}}$	$M_3^{\text{модиф}}$
0	-0,1556	0,8793	-0,5955	-0,1897	1,0127	-0,6669
0,5	-0,0780	0,2846	-0,3644	-0,0610	0,1807	-0,3459
$T = 1$	0,1444	-0,2897	-0,1065	0,1052	-0,2682	-0,1246

Значения функционала оптимизации в традиционной и модифицированной задаче: $J^{\text{традиц}} = 0,47824$, $J^{\text{модиф}} = 0,47975$. В рассматриваемом примере расхождение между значениями функционала (2.1) для традиционной и модифицированной задач составляет 0,315 %,

Пример 2 (МКС) $I_1 = 4\,853\,000 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $I_2 = 23\,601\,000 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $I_3 = 26\,278\,000 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ (размерные моменты инерции) или $I_1 = 0,2358$, $I_2 = 1,1466$, $I_3 = 1,2766$ (безразмерные моменты инерции). Значения функционала оптимизации в традиционной и модифицированной задаче: $J^{\text{традиц}} = 0,35522$, $J^{\text{модиф}} = 0,36404$. Расхождение между значениями функционала (2.1) для традиционной и модифицированной задач составляет 2,37 %,

Пример 3 (КА "Спейс Шаттл") $I_1 = 3\,400\,648 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $I_2 = 21\,041\,672 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $I_3 = I_2 = 21\,041\,672 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ (размерные моменты инерции) или $I_1 = 0,1967$, $I_2 = 1,2168$, $I_3 = I_2 = 1,2168$ (безразмерные моменты инерции). Значения функционала оптимизации в традиционной и модифицированной задаче: $J^{\text{традиц}} = 0,35797$, $J^{\text{модиф}} = 0,36775$. Расхождение между значениями функционала (2.1) для традиционной и модифицированной задач составляет 2,73 %.

Ниже для примера 2 (МКС) на рис. 1, 2 представлены графики изменения во времени компонент угловой скорости КА $\omega_i(t)$, $i = \overline{1,3}$, векторной части кватерниона ориентации КА $\Lambda_i(t)$, $i = \overline{1,3}$, и компонент вектора управляющего момента $M_i(t)$, $i = \overline{1,3}$ в традиционной и модифицированной задаче оптимального разворота.

Следует отметить, что в примере 1 (сферическая симметрия КА) значения функционала (2.1) и управляющие моменты в традиционной и модифицированной задачах практически совпали. Из примеров 2, 3 видно, что с возникновением существенной разницы между моментами инерции КА (твердого тела) I_1 , I_2 , I_3 увеличивается расхождение между управляющими моментами, полученными при решении традиционной и модифицированной задач в зависимости от характера изменения моментов инерции КА между собой. Но в то же время различие между значениями функционала качества процесса управления (2.1), вычисленными при решении традиционной и модифицированной задач, приемлемо. Надо заметить, что значение функционала качества процесса управления — определяющая характеристика задачи.

На основе большого объема проведенных численных расчетов решения задачи об оптимальном

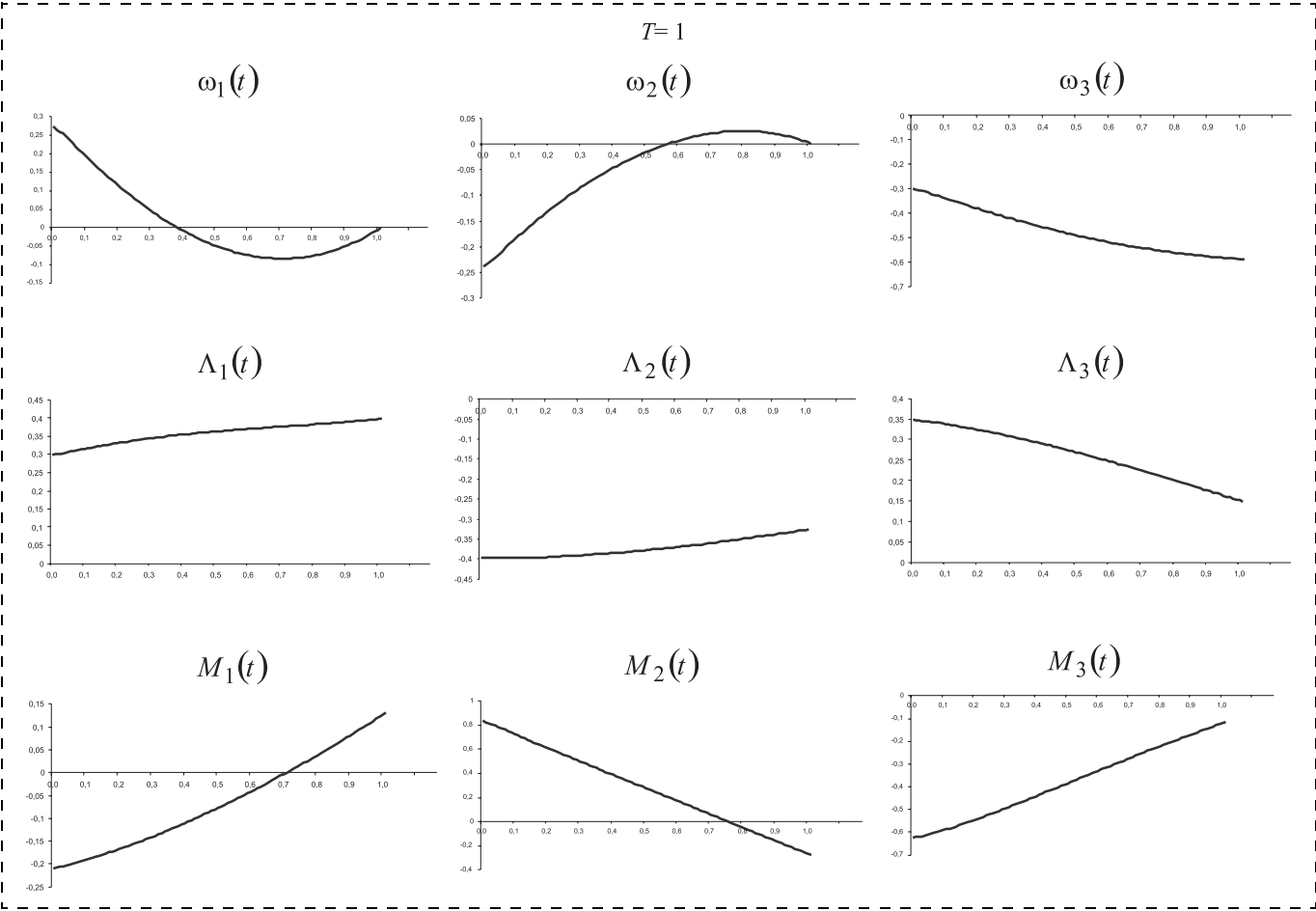


Рис. 1. Результаты решения традиционной задачи

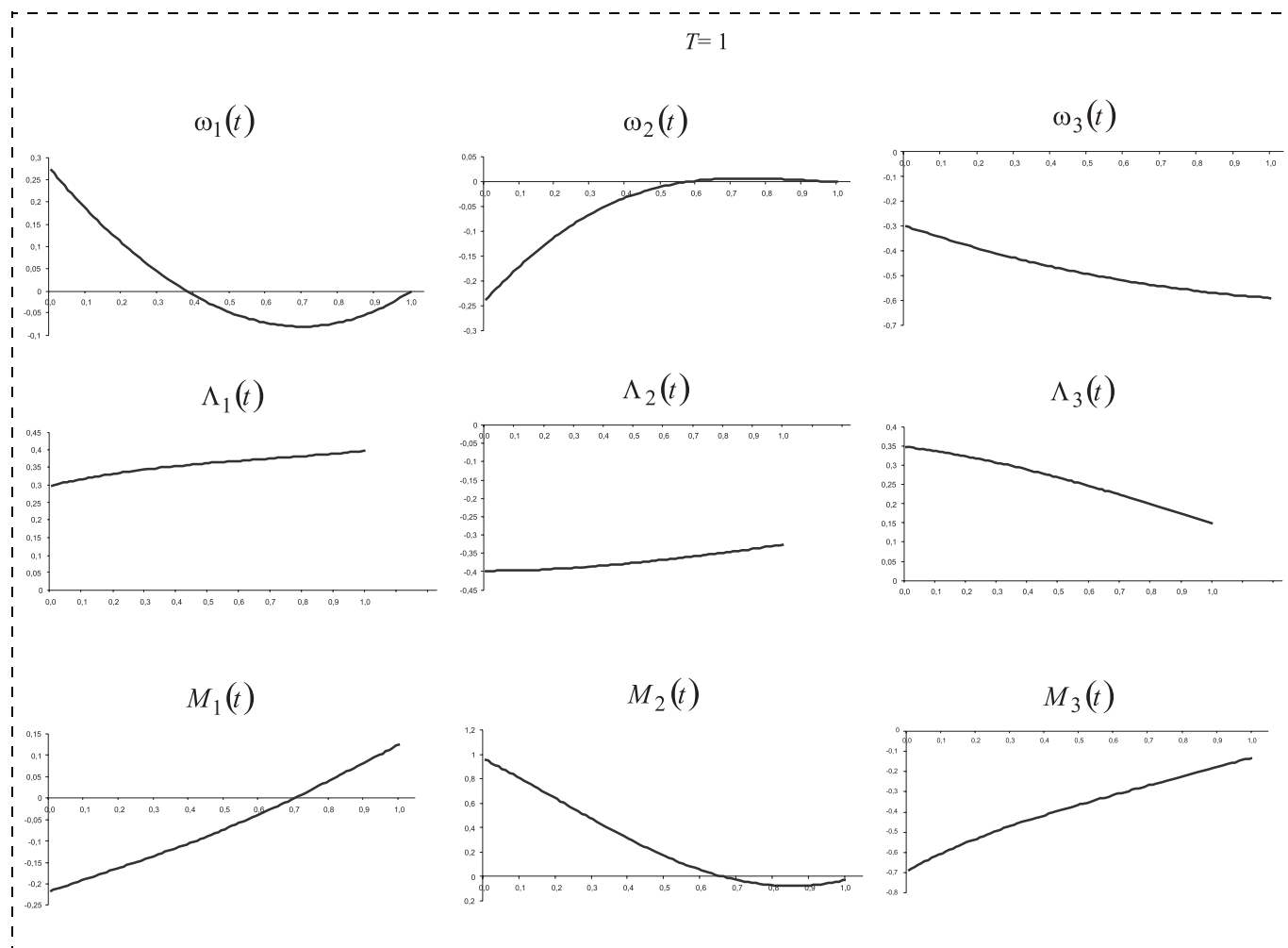


Рис. 2. Результаты решения модифицированной задачи

развороте КА (твёрдого тела) для различных граничных условий и для различных распределений масс в КА, что характеризуется значениями главных моментов инерции I_1 , I_2 , I_3 , можно сделать следующие выводы:

1) кинематические характеристики разворота КА (кватернион ориентации Λ и вектор угловой скорости ω) в традиционной задаче слабо зависят от распределения масс в твёрдом теле (КА) и, в основном, определяются граничными условиями задачи, а в модифицированной задаче кинематические характеристики вращения КА зависят только от граничных условий задачи;

2) управляющий момент существенно зависит от распределения масс в КА и граничных условий и в традиционной, и в модифицированной постановках задачи.

Из сравнения результатов расчетов следует, что аналитическое решение модифицированной задачи представляет собой приближенное решение задачи об оптимальном развороте КА в традиционной постановке. В табл. 4 представлены значения компонент кватернионов ориентации КА рассмотренных выше динамических конфигураций в традици-

онной задаче и результаты решения модифицированной задачи в середине интервала времени движения ($t = 0,5$) при граничных условиях (6.6). Различие в компонентах кватернионов ориентации КА в традиционной и модифицированной задачах наблюдается в третьем или четвертом знаке после запятой, причем различие в третьем знаке составляет не более трех единиц.

Также отметим, что кватернион ориентации твёрдого тела $\Lambda(t)$ может быть двузначным [1], т. е. Λ и $-\Lambda$ соответствуют одному и тому же угловому положению твёрдого тела в пространстве.

Таблица 4

Конфигурация КА; традиционная задача	λ_0	λ_1	λ_2	λ_3
КА "Спейс Шаттл"	0,80773	0,36539	-0,37727	0,26781
МКС	0,80862	0,36344	-0,37795	0,26683
Сферически-симметричный КА	0,80959	0,36252	-0,37679	0,26679
Модифицированная задача	0,80987	0,36268	-0,37564	0,26734

Заключение

Представленное в статье аналитическое приближенное решение задачи оптимального разворота КА (твердого тела) произвольной динамической конфигурации при произвольных граничных условиях по угловому положению и угловой скорости КА может найти свое применение при построении систем управления КА, как и известные аналитические решения задачи оптимальной переориентации сферически-симметричного КА в классе плоских эйлеровых разворотов.

Список литературы

1. Бранец В. Н., Шмыглевский И. П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. М.: Наука, 1973. 320 с.
2. Scrivenner S. L., Thompson R. C. Survey of Time-Optimal Attitude Maneuvers // J. Guidance, Control, and Dynamics. 1994. V. 17, N 2. P. 225–233.
3. Петров Б. Н., Боднер В. А., Алексеев К. Б. Аналитическое решение задачи управления пространственным поворотным маневром // Докл. АН СССР. 1970. Т. 192. № 6. С. 1235–1238.
4. Бранец В. Н., Черток М. Б., Казначеев Ю. В. Оптимальный разворот твердого тела с одной осью симметрии // Космич. исслед. 1984. Т. 22. Вып. 3. С. 352–360.
5. Сиротин А. Н. Оптимальное управление переориентацией симметричного твердого тела из положения покоя в положение покоя // Изв. АН СССР. МТТ. 1989. № 1. С. 36–46.
6. Сиротин А. Н. Об оптимальной по быстрдействию пространственной переориентации в положение покоя вращающегося сферически-симметричного твердого тела // Изв. РАН. МТТ. 1997. № 3.
7. Молоденков А. В. Кватернионное решение задачи оптимального в смысле минимума энергетических затрат разворота

твердого тела // Проблемы механики и управления. Сб. научн. трудов. Пермь: ПГУ, 1995. С. 122–131.

8. Молоденков А. В. Решение задачи оптимального разворота сферически симметричного космического аппарата для одного частного случая // Сб. трудов 6-й междунар. конф. "Системный анализ и управление космическими комплексами". Крым, Евпатория. М.: МАИ, 2001. С. 42.

9. Сапунков Я. Г., Молоденков А. В. Численное решение задачи оптимальной переориентации вращающегося космического аппарата // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 6. Автоматическое и автоматизированное управление летательными аппаратами. 2008. № 6. С. 10–15.

10. Сапунков Я. Г., Молоденков А. В. Решение модифицированной задачи оптимального разворота космического аппарата // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 11. С. 66–70.

11. Молоденков А. В., Сапунков Я. Г. Аналитическое решение задачи оптимального разворота сферически-симметричного космического аппарата в классе конических движений // Изв. РАН. ТиСУ. 2013. № 2. С. 163–172.

12. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1961. 384 с.

13. Молоденков А. В. К решению задачи Дарбу // Изв. РАН. МТТ. 2007. № 2. С. 3–13.

14. Банит Ю. Р., Беляев М. Ю., Добринская Т. А., Ефимов Н. И., Сазонов В. В., Стажков В. М. Определение тензора инерции международной космической станции по телеметрической информации. Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. 2002. № 57. 19 с.

15. Li F., Bainum P. M. Numerical Approach for Solving Rigid Spacecraft Minimum Time Attitude Maneuvers // J. Guidance, Control, and Dynamics. 1990. V. 13, N 1. P. 38–45.

16. Lastman G. J. A Shooting Method for Solving Two-Point Boundary-Value Problems Arising from Non-Singular Bang-Bang Optimal Control Problems // Intern. J. Control. 1978. V. 27, N 4. P. 513–524.

Algorithm for the Optimal Turn of a Spacecraft in the Sense of the Minimal Energy Loss under Arbitrary Boundary Conditions

Ya. G. Sapunkov, A. V. Molodenkov, iptmuran@san.ru ✉,
Institute of Precision Mechanics and Control Problems, RAS, Saratov

Corresponding author: Molodenkov Aleksey V., Ph. D., Senior Researcher,
Laboratory of Mechanics, Navigation and Motion Control,
Institute of Precision Mechanics and Control Problems, RAS, Saratov, 410028, Russian Federation
e-mail: iptmuran@san.ru

Received on April 08, 2015

Accepted April 24, 2015

The problem of the optimal turn in the sense of minimal energy loss of a spacecraft as a rigid body with an arbitrary distribution of mass without constraint of a control action and under arbitrary boundary conditions is considered in the quaternion statement. In the class of the generalized conical motions a modification was made of the task of optimal rotation, which allowed to obtain analytical solution to the movement equations containing any constants and two any scalar functions (parameters of the generalized conic movement). Concerning these functions and their derivatives the optimizing problem with a square functionality, in which the second derivative of these two functions acts as control, was formulated and solved using Pontryagin maximum principle. Explicit expressions for the optimal angular velocity and the optimal control vectors of a spacecraft are presented. The motion trajectory of a spacecraft is generalized as a conical precession. Algorithm for the optimal turn of a spacecraft is given. The found analytical solution to the modified problem can be considered as an approximate solution to the classical problem of an optimal turn of a spacecraft under arbitrary boundary conditions. Numerical examples are presented showing that the solution of the modified problem well approximates the solution of the classical problem of a spacecraft optimal turn. These examples contain reorientations of the International Space Station and of the Space Shuttle.

Keywords: optimal control, spacecraft, rigid body with an arbitrary distribution of mass, generalized conical motion, arbitrary boundary conditions

Acknowledgements: This work was supported by a grant from the Russian Foundation for Basic Research, project No. 12-01-00165.

For citation:

Sapunkov Ya. G., Molodenkov A. V. Algorithm for the Optimal Turn of a Spacecraft in the Sense of the Minimal Energy Loss under Arbitrary Boundary Conditions, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 8, pp. 536–544.

DOI: 10.17587/mau.16.536-544

References

1. **Branets V. N., Shmyglevskii I. P.** *Primenenie kvaternionov v zadachax orientatsii tverdogo tela* (The Use of Quaternions in Problems of Orientation of Solid Bodies), Moscow, Nauka, 1973, 320 p. (in Russian).
2. **Scriven S. L., Thompson R. C.** Survey of time-optimal attitude maneuvers, *J. Guidance, Control, and Dynamics*, 1994, vol. 17, no. 2, pp. 225–233.
3. **Petrov B. N., Bodner V. A., and Alekseev K. B.** *Analiticheskoe reshenie zadachi upravleniya prostranstvennym povorotnym manevrom* (Analytical Solution of the Spatial Slew Manuever), *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1970, vol. 192, no. 6, pp. 1235–1238 (in Russian).
4. **Branets V. N., Chertok M. B., and Kaznacheev Yu. V.** *Optimal'nyj razvorot tverdogo tela s odnoy osyu simmetrii* (Optimal Slew of a Solid Body with a Single Symmetry Axis), *Kosmicheskie Issledovaniya*, 1984, vol. 22, no. 3, pp. 352–360 (in Russian).
5. **Sirotin A. N.** *Optimal'noe upravlenie pereorientatsiej simmetrichnogo tverdogo tela iz polozheniya pokoya v polozhenie pokoya* (Optimal Reorientation of a Symmetric Solid Body from a State of Rest to Another State of Rest), *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Mekh. Tverd. Tela*, 1989, no. 1, pp. 36–46 (in Russian).
6. **Sirotin A. N.** *Ob optimal'noj po bystrodejstviyu prostranstvennoj pereorientatsii v polozhenie pokoya vrashhayushhegosya sfericheskii-simmetrichnogo tverdogo tela* (On the Time-Optimal Spatial Reorientation of a Rotating Spherically Symmetric Solid Body to a State of Rest), *Izvestiya Rossiyskoi Akademii Nauk. Mekh. Tverd. Tela*, 1997, no. 3, pp. 18–27 (in Russian).
7. **Molodenkov A. V.** *Kvaternionnoe reshenie zadachi optimal'nogo v smysle minimuma energeticheskix zatrat razvorota tverdogo tela* (Quaternion-Based Solution of the Energy Optimal Slew of a Solid Body), in *Collected Papers "Problems of Mechanics and Control"*, Perm Gos. Univ., 1995, pp. 122–131 (in Russian).
8. **Molodenkov A. V.** *Solution of the Optimal Slew Problem for a Spherically Symmetric Spacecraft for a Specific Case* (Reshenie zadachi optimal'nogo razvorota sfericheskii simmetrichnogo kosmicheskogo apparata dlya odnogo chastnogo sluchaya), in *Proc. of 6-th Int. Conf. on System Analysis and Control of Space Systems*, Evpatoriya, Ukraine, Moscow Institute of Aviation, 2001, pp. 42 (in Russian).
9. **Sapunkov Ya. G., Molodenkov A. V.** *Chislennoe reshenie zadachi optimal'noj pereorientatsii vrashhayushhegosya kosmicheskogo apparata* (Numerical Solution of the Optimal Spacecraft Reorientation Problem), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2008, no. 6, pp. 10–15 (in Russian).
10. **Sapunkov Ya. G., Molodenkov A. V.** *Reshenie modifitsirovannoj zadachi optimal'nogo razvorota kosmicheskogo apparata* (Solution of the Modified Problem of the Optimal Turn of a Spacecraft) *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2012, no. 11, pp. 66–70 (in Russian).
11. **Molodenkov A. V., Sapunkov Ya. G.** *Analiticheskoe reshenie zadachi optimal'nogo razvorota sfericheskii-simmetrichnogo kosmicheskogo apparata v klasse konicheskix dvizhenij* (Analytical Solution of the Optimal Slew Problem of a Spherically Symmetric Spacecraft in the Class of Conical Motion), *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2013, vol. 52, no. 3, pp. 491–501 (in Russian).
12. **Pontryagin L. S., Boltyanskii V. G., Gamkrelidze R. V., and Mishchenko E. F.** *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh processov* (The Mathematical Theory of Optimal Processes). Moscow, Nauka, 1961, 384 p. (in Russian).
13. **Molodenkov A. V.** *K resheniyu zadachi Darbu* (On the Solution of the Darboux Problem), *Mechanics of Solids*, 2007, vol. 42, no. 2, pp. 167–176 (in Russian).
14. **Banit Yu. R., Belyaev M. Yu., Dobrinskaya T. A., Efimov N. I., Sazonov V. V., Stazhkov V. M.** *Opreделение tenzora inercii mezhdu-narodnoj kosmicheskoy stancii po teletricheskoy informatsii* (Estimating the Inertia Tensor of the International Space Station on the Base of the Telemetry Information), *Preprint of the Inst. of Appl. Math. of RAS*, 2002, no. 57, 19 p. (in Russian).
15. **Li F., Bainum P. M.** Numerical Approach for Solving Rigid Spacecraft Minimum Time Attitude Maneuvers, *J. Guidance, Control, and Dynamics*, 1990, vol. 13, no. 1, pp. 38–45.
16. **Lastman G. J.** A Shooting Method for Solving Two-Point Boundary-Value Problems Arising from Non-Singular Bang-Bang Optimal Control Problems, *Intern. J. Control*, 1978, vol. 27, no. 4, pp. 513–524.

III ЕЖЕГОДНАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ ВЫСТАВКА

**ВУЗ
ПРОМ
ЭКСПО
2015**

ОТ ИДЕИ К РЕАЛЬНОСТИ

2-4 ДЕКАБРЯ 2015

Федеральная площадка для демонстрации потенциала современных технологий и научных изобретений России
Научный шаг в будущее России

организаторы:

стратегические партнеры:

Технополис «Москва» г. Москва, Волгоградский проспект 42/13

- БОЛЕЕ 100 ВУЗОВ, а также:
- ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПРЕДПРИЯТИЯ
- НАУЧНЫЕ ОРГАНИЗАЦИИ
- МАЛЫЕ ИННОВАЦИОННЫЕ ПРЕДПРИЯТИЯ
- ИНЖИНИРИНГОВЫЕ ЦЕНТРЫ
- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПЛАТФОРМЫ
- ГОСУДАРСТВЕННЫЕ КОРПОРАЦИИ
- ТЕРРИТОРИАЛЬНЫЕ ИННОВАЦИОННЫЕ КЛАСТЕРЫ

vuzpromexpo.ru

Министерство образования и науки Российской Федерации

МИНИПРОМТОР РОССИИ

ROSATOM

Ростех

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ ПРАВИТЕЛЬСТВА МОСКВЫ

В. М. Лохин, д-р техн. наук, проф., cpd@mirea.ru, **С. В. Манько**, д-р техн. наук, проф.,
Р. И. Александрова, науч. сотр., **С. А. К. Диане**, аспирант, **А. С. Панин**, студент,
МГТУ МИРЭА, Москва

Механизмы интеллектуальных обратных связей, обработки знаний и самообучения в системах управления автономными роботами и мультиагентными робототехническими группировками

Обоснован перечень задач самообучения интеллектуальных систем управления автономными роботами и мультиагентными робототехническими группировками. Обсуждаются основные проблемы создания интеллектуальных самообучающихся систем управления. Показано, что один из наиболее перспективных подходов к реализации процессов самообучения в интеллектуальных системах управления автономными роботами и мультиагентными робототехническими группировками связан с использованием метода автоматического построения деревьев классификации. Приводятся результаты комплексного моделирования.

Ключевые слова: автономный робот, мультиагентная робототехническая группировка, интеллектуальная система управления, интеллектуальная обратная связь, самообучение, деревья классификации

Введение

Современные достижения в области интеллектуального управления, информационных, телекоммуникационных и сетевых технологий обуславливают реальные возможности создания автономных роботов и мультиагентных робототехнических систем, способных к выполнению требуемых операций в условиях неопределенности рабочей обстановки и внешних возмущений различного характера. Первые образцы автономных роботов начинают находить свое практическое применение в различных прикладных сферах. Тем не менее, проблемы повышения степени адаптивности, надежности и качества функционирования полуавтоматических и автономных роботов были и остаются предметом фундаментальных и прикладных исследований в области принципов построения интеллектуальных систем обработки информации и управления. Сложность построения таких систем, потенциально обеспечивающих повышенный уровень тактико-технических характеристик и функциональной эффективности, определяется не только проблемами формирования закладываемых в них знаний, но и вопросами организации интеллектуальных обратных связей на базе многокритериальной интерпретации разнородной сенсорной информации.

Развитие технологий самообучения, основанных на современных методах обработки машинных форм представления знаний, открывает широкие перспективы как для автоматизации синтеза и настройки интеллектуальных систем управления, так и для совершенствования их функциональных и адапта-

ционных возможностей на основе анализа и обобщения результатов своей работы в процессе штатной эксплуатации. Подобные технологии представляют интерес для принципиально различных приложений — от интеллектуальных систем управления приводами до автономных робототехнических систем, способных адаптировать свои моторно-двигательные, поведенческие и кооперативно-поведенческие функции к априорно непредусмотренным условиям внешней обстановки.

Настоящая статья продолжает цикл авторских публикаций, посвященных проблематике группового управления автономными роботами, которые должны обеспечивать совместное решение поставленных прикладных задач, взаимодействуя друг с другом [1–6]. В статье рассматриваются вопросы реализации процессов самообучения в интеллектуальных системах управления автономными роботами и мультиагентными робототехническими группировками на основе метода автоматического построения деревьев классификации. Приводятся результаты моделирования, демонстрирующие эффективность применения средств самообучения интеллектуальной бортовой системы управления автономным мобильным роботом для повышения его адаптивных свойств при работе в априорно неопределенных условиях. Показано, что эффективность процессов самообучения интеллектуальных роботов, действующих в группе, может быть существенно повышена за счет организации взаимного обмена накапливаемыми знаниями.

Особенности построения систем автоматического управления с учетом требований по обеспечению адаптивных свойств

Развитие принципов построения систем автоматического управления (САУ) различных типов и назначения во многом обусловлено необходимостью обеспечения их адаптивных свойств по поддержанию требуемых показателей надежности и качества функционирования при наличии возмущений и факторов неопределенности (рис. 1).

Так, введение контура обратной связи при формировании замкнутых САУ в каком-то смысле может рассматриваться в качестве простейшего механизма адаптации, позволяющего регулировать значение выходного сигнала по его отклонению от заданного уровня.

Принципы построения адаптивных САУ предполагают, что компенсация возмущений (в ограниченных и априорно известных диапазонах) должна осуществляться за счет целенаправленных изменений параметров или структуры регулятора. В связи с этим в состав системы, ориентированной на использование специализированных алгоритмов адаптивного управления, вводятся такие структурные элементы, как эталонная модель, идентификатор, дополнительные обратные связи и ряд др. Создание систем для работы в условиях существенной неопределенности среды и действующих возмущений основано на использовании принципов ситуационного управления, реализуемых с привлечением методов и технологий искусственного интеллекта. Адаптивность подобных систем, называемых интеллектуальными, определяется широтой набора априорно закладываемых в них знаний, которые для каждого из классов возможных ситуаций регламентируют выбор необходимого ре-

шения по управлению из состава соответствующих библиотек.

Перспективы повышения адаптивных свойств интеллектуальных САУ связаны с применением средств и методов самообучения, позволяющих обеспечить обобщение накапливаемого опыта и формирование новых знаний по сохранению своей работоспособности при возникновении непредвиденных ситуаций. Следует отметить, что организация самообучения систем управления в общем случае предполагает необходимость введения в их состав интеллектуальной обратной связи, реализующей смысловую интерпретацию поступающего потока разнородной сенсорной информации и включающей в качестве дополнительного структурного элемента модель внешнего мира.

Задачи и методы самообучения интеллектуальных систем обработки информации и управления автономных роботов

Тематика самообучающихся интеллектуальных систем управления (ИСУ) приобретает особую остроту и актуальность в контексте современной робототехники, перспективные образцы которой должны обеспечивать выполнение требуемых миссий в автономном режиме функционирования в условиях непредсказуемости реальной обстановки.

Многогранность проблемы разработки бортовых самообучающихся ИСУ автономными роботами обуславливает необходимость решения целого спектра взаимосвязанных вопросов, главными из которых являются:

- развитие средств и методов формирования новых или уточнения имеющихся знаний с учетом специфики решаемых задач самообучения и особенностей функционирования ИСУ;
- разработка методов и технологий интеллектуальных обратных связей, обеспечивающих интерпретацию и обобщение разнородной сенсорной информации для подготовки репрезентативных примеров, анализируемых при самообучении;
- разработка механизмов памяти, обеспечивающих оперативное сохранение значимой информации и удаление данных, потерявших свою актуальность.

Анализ факторов неопределенности, адаптация к которым должна осуществляться самообучающимися ИСУ в процессе функционирования автономных роботов в условиях экстремальных сред [7], позволяет сформировать классификацию задач автоматического формирования новых знаний, представленную на рис. 2 и включающую следующие основные категории:



Рис. 1. Развитие принципов построения систем автоматического управления

- автоматическая классификация наблюдаемых объектов, явлений, событий, ситуаций и процессов с выявлением их сходства и различий;
- выявление закономерностей внешнего мира, окружающей среды и рабочей обстановки;
- выявление условий эффективного использования собственных функциональных возможностей в различных ситуациях;
- автоматическое формирование правил целесообразного поведения;
- автоматическое формирование алгоритмов управления.

В той или иной постановке задачи формирования знаний всегда являлись предметом пристального внимания теории искусственного интеллекта. В рамках такого ее подраздела, как машинное обучение, предложены различные подходы к их решению, основанные на использовании методов кластеризации, обучения с подкреплением, генетических алгоритмов, байесовского обучения, деревьев принятия решений и др. [8–12].

До определенного момента времени применение этих методов в робототехнике представляло скорее академический, нежели практический интерес. Однако необходимость создания автономных роботов с высокой степенью адаптивности к условиям неопределенности экстремальных сред обусловило резкую активизацию как фундаментальных, так и прикладных исследований в области интеллектуальных самообучающихся систем управления.

Ярким примером, иллюстрирующим данную тенденцию, может служить научно-исследовательская программа *LAGR (Learning Applied to Ground Robots)* [13], развернутая по инициативе Агентства перспективных оборонных исследований Министерства обороны США *DARPA* в 2004 г. и направленная на развитие технологий обучения и самообучения для повышения эффективности бортовых средств распознавания обстановки, навигации, а также планирования движений и поведения автономных мобильных роботов. К участию в программе из состава ведущих технических университетов и научно-исследовательских центров США было привлечено восемь групп разработчиков, действующих независимо и параллельно друг другу. В целях объективности оценки получаемых результатов каждой научно-исследовательской группе был предоставлен типовый образец автономного мобильного робота (рис. 3, а, см. вторую сторону обложки), предназначенный для проведения экспериментальных исследований и укомплектованный интеллектуальной бортовой системой управления с широким набором информационно-измерительных средств,



Рис. 2. Классификация задач самообучения интеллектуальных систем обработки информации и управления

включая GPS, систему инерциальной навигации, стереоскопическую систему технического зрения, инфракрасные и другие датчики.

С 2013 г. Агентство перспективных оборонных исследований Министерства обороны США *DARPA* запустило еще более амбициозную программу *PPAML (Probabilistic Programming for Advanced Machine Learning)* [14, 15], направленную на разработку универсальных инструментов создания интеллектуальных систем на основе развития средств и методов вероятностного программирования для решения задач машинного обучения.

Результаты фундаментальных исследований в области самообучения начали находить практическое воплощение в создании опытных и макетных образцов роботов, демонстрирующих возможности и преимущества использования средств автоматического формирования знаний.

Так, антропоморфный робот *SOINN-Robot (Hasegawa Lab, Japan)* (рис. 3, б, см. вторую сторону обложки) [16], разработанный в Токийском технологическом институте, предназначен для отработки технологий самообучения на базе самоорганизующихся инкрементальных нейросетей *SOINN (Self-Organizing Incremental Neural Network)* с возможностью формирования знаний при автоматическом анализе примеров (в том числе извлекаемых по каналам сети Интернет), а также в процессе человеко-машинного взаимодействия на уровне сеансов показа или естественно-языкового диалога.

Автономный шагающий робот *Starfish (Cornell University, USA)*, показанный на рис. 3, в (см. вторую сторону обложки) [17], предназначен для отработки технологий эволюционного самообучения, позволяющих обеспечить полный цикл автоматического

формирования механизмов целесообразного поведения — от создания собственной модели (как объекта управления) до алгоритмов контролируемой походки.

Создание мехатронно-модульных роботов, способных реконфигурировать свою структуру в зависимости от условий функционирования и специфики выполняемой прикладной задачи, во многом сопряжено с разработкой интеллектуальных самообучающихся систем управления [18]. В рамках многочисленных программ, ведущихся в этой области во всех развитых странах мира, исследуются различные подходы к решению проблем самоорганизации и самообучения.

Так, в частности, одна из главных целей проекта "АРАКС" (МГТУ МИРЭА, Россия), направленного на разработку автономного робота с адаптивной кинематической структурой (рис. 4, см. вторую сторону обложки), связана с автоматическим синтезом алгоритмов управления движением на основе методов генетического программирования [19–21].

Следует отметить, что в тех или иных масштабах научно-исследовательские работы аналогичного плана стали проводиться во многих развитых странах мира, а полученные результаты начали находить свое практическое применение, подтверждая целесообразность использования средств и методов самообучения в качестве эффективного инструмента обеспечения адаптивных свойств автономных роботов на основе обобщения опыта и результатов их функционирования.

Метод построения деревьев классификации для поиска скрытых закономерностей в больших массивах данных

Перспективный подход к организации процессов самообучения автономных роботов связан с развитием механизмов обобщения приобретаемого опыта, который в неявной форме аккумулируется в показателях бортовых информационно-измерительных средств. Анализ и интерпретация накапливаемых в памяти массивов сенсорных данных могли бы обеспечить выявление значимых закономерностей как об эффективности действий самого робота, так и о характере его рабочей среды. В связи с этим методы глубинного анализа данных (*Data Mining*) [22, 23], использующие парадигму индуктивного обучения и нашедшие широкое применение в таких прикладных сферах, как распознавание образов, медицинская диагностика, экономическое прогнозирование и пр., представляют крайний интерес для решения задач формирования новых знаний в составе интеллектуальных систем управления автономными роботами.

Построение деревьев классификации (деревьев принятия решений) является одним из эффективных методов индуктивного вывода логических закономерностей [24]. Рассматриваемая постановка

задачи предполагает формирование некоторой логической функции, позволяющей обеспечить классификацию объектов, примеры которых s в тестовой выборке S описываются наборами значений характеристических X и идентификационных Y параметров:

$$s \in S: (X, Y) \equiv (x_1, x_2, \dots, x_m, y_1, y_2, \dots, y_n) \in R^{m+n}, (1)$$

где $X: (x_1, x_2, \dots, x_m)$ — характеристические параметры, через которые составляется классификация; $Y: (y_1, y_2, \dots, y_n)$ — идентификационные параметры, определяющие принадлежность к соответствующим классам.

Искомая логическая функция должна с максимальной точностью отражать выявляемую закономерность между характеристическими и идентификационными параметрами анализируемого массива данных:

$$Y = f(X): E = \sum_{s \in S} (s_y - f(s_x))^2 \rightarrow \min,$$

где $s_y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, $s_x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$.

Формирование подобной функции, осуществляемое на основе анализа тестовых примеров, обуславливает возможность последующей классификации объектов, описания которых ограничиваются наборами характеристических параметров и не представлены в исходной выборке.

В основу метода построения деревьев классификации положен принцип дихотомизации выборки, осуществляемой с учетом снижения меры неопределенности (энтропии). При этом под дихотомизацией понимается способ логического разбиения класса на подклассы с делением исходного понятия на два взаимоисключающих.

Так, для исходного множества примеров вида (1) оценка общей энтропии по определению осуществляется следующим образом:

$$H(S, Y) = - \sum_{y \in \{Y\}} P(y, S) \log_2 P(y, S), \quad (2)$$

где $\forall y \in \{Y\} P(y, S) = \frac{|S:y|}{|S|}$ — статистические вероятности для всех комбинаций значений $\{Y\}$ параметров Y .

После выбора некоторого логического предиката d , однозначно вычисляемого для данного X , в множестве примеров S выделяются два подмножества:

$$\begin{aligned} S^d &= S:d, \text{ т. е. подмножество } S, \\ &\text{на котором } d \text{ истинен;} \\ S^{\bar{d}} &= S:\bar{d}, \text{ т. е. подмножество } S, \\ &\text{на котором } d \text{ ложен.} \end{aligned}$$

Для сформированных подмножеств так же, как и для исходного, определяются статистические ве-

роятности для параметров Y и соответствующие значения энтропии:

$$p^d = P(y, S^d), p^{\bar{d}} = P(y, S^{\bar{d}});$$

$$H(S^d, Y), H(S^{\bar{d}}, Y).$$

По свойству дихотомизации [25] полученные подмножества будут удовлетворять выполнению следующего условия:

$$P(d, S)H(S^d, Y) + P(\bar{d}, S)H(S^{\bar{d}}, Y) \leq H(S, Y).$$

Следует отметить, что статистическая энтропия (2) представляет собой функцию, имеющую максимальное значение при равновероятном соотношении всех значений Y в выборке и убывающую до 0 при стремлении вероятности одного из них к 1.

Очевидно, что наиболее полезным критерием разбиения будет такой, который максимизирует расхождение вероятностей, позволяя наиболее точно классифицировать идентификационные параметры.

Существуют несколько вариантов формализации данных требований в виде соответствующих критериев, которые, совпадая в сравнениях, будут различаться своей вычислительной сложностью [26].

Критерий статистической связности отличается простотой выполнения необходимых расчетов и удобством применения в задаче оптимизации численных параметров закономерности разбиения d :

$$L(d, S, Y) = \sum_{y \in Y} \left(\frac{P(y \cap d, S) - P(y \cap \bar{d}, S)}{2(P(y \cap d, S) + P(y \cap \bar{d}, S))} + \frac{P(\bar{y} \cap d, S) - P(\bar{y} \cap \bar{d}, S)}{2(P(\bar{y} \cap d, S) + P(\bar{y} \cap \bar{d}, S))} \right)^2;$$

$$L(d, S, Y) \rightarrow \max.$$

Критерий прироста информации от дихотомии d на пространстве S примеров для множества Y ключевых параметров, который, по сути, описывает падение энтропии от разбиения, обладает большей общностью, но одновременно является более сложным в вычислительном плане:

$$IG(d, S, Y) = H(S, Y) - \sum_{t \in D} P(t, S)H(S^t, Y) \rightarrow \max, (3)$$

где D — множество значений d , $\{d, \bar{d}\}$.

Поскольку уменьшаемое в выражении (3) (энтропия до разделения) не зависит от дихотомии, выбор предиката разделения d фактически сводится к минимизации апостериорной энтропии.

Таким образом, сущность метода построения деревьев классификации заключается в последовательной итеративной дихотомизации исходного множества и его дочерних подмножеств вплоть до отыскания разбиения с минимальной суммарной энтропией.

Результат процедуры последовательной дихотомизации можно представить в виде дерева классификации (рис. 5), где каждому узлу отвечает определенное разбиение по предикату $d_1, \dots, n$.

Локальное завершение процесса дихотомизации происходит в том случае, если для некоторого данного подмножества S' элементов выборки не существует такого предиката разбиения d , который давал бы ненулевое значение прироста информации $IG(d, S', Y) \neq 0$.

Для каждого из узлов, удовлетворяющих этому условию и именуемых конечными, вычисляется итог классификации как результирующее распределение R вероятностей для Y [8].

Очевидно, что при нулевой энтропии все элементы подвыборки данного узла имеют одинаковую комбинацию значений Y , которая и будет являться результатом классификации.

Один из ключевых вопросов разработки эффективной процедуры дихотомизации выборки связан с отысканием необходимого оператора и параметров разбиения.

Для дискретного набора характеристических параметров X оптимизация логического критерия разбиения сводится к выбору наиболее полезного из набора идентификационных параметров Y . Такое решение обусловливается тем фактом, что любая логическая формула, составленная на основе логических параметров, может быть заменена эквивалентным деревом классификации, критериями разбиения у которого будут выступать только исходные параметры, образующие данную формулу.

В свою очередь, для набора численных параметров выбор критериев разбиения является не столь однозначным, поскольку в этих целях потенциально могут использоваться любые математические функции. На практике для отыскания оптимального разбиения применяются различные методики [27, 28]. Один из наиболее перспективных подхо-

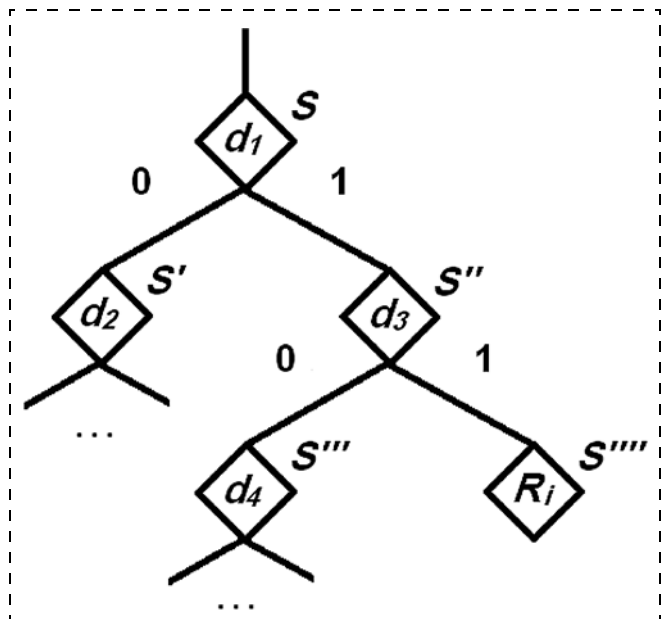


Рис. 5. Построение классификационного дерева путем последовательной дихотомизации исходного множества и его дочерних подмножеств

дов к решению этой задачи связан с привлечением метода поисковых графов [29]. Его идеология базируется на соображении о том, что если дихотомия вида $x_i + x_j + C_1 > 0$ дает высокий прирост информации, то закономерности $x_i + C_2 > 0$, $x_j + C_2 > 0$ будут давать также определенный прирост информации, однако меньший, чем у их комбинации. Здесь $x_{i,j}$ — параметры из числа исходных данных или функции от них, $C_{1,2}$ — некоторые константы, полученные в результате оптимизации прироста информации. Аналогичные суждения применимы и для других математических действий, например, произведения, возведения в степень, логарифмирования и т. п.

Метод поисковых графов в математической постановке использует данное соображение в обратную сторону. Его сущность заключается в формировании графа из возможных дихотомий в соответствии со следующими правилами.

Основой графа являются исходные численные параметры из множества известных значений. Узлы комбинированных закономерностей получаются путем применения комбинирующих операций к соответствующему числу уже существующих в системе узлов. Например, линейная комбинация или произведение есть операции от любого числа аргументов, синус — унарная, логарифм — бинарная операции. Наличествующие для данных операций константы оптимизируются численно и не фиксируются до завершения оптимизации.

Все комбинации, прирост информации от которых меньше прироста информации от разбиения по хотя бы одному из участвующих в комбинации элементов, выбраковываются. Все прочие комбинации могут выступать в качестве элементов новых комбинаций, при этом процесс идет, пока в нем остались нерассмотренные комбинации. Результирующая дихотомия есть наилучшая из комбинаций, полученных в процессе поиска.

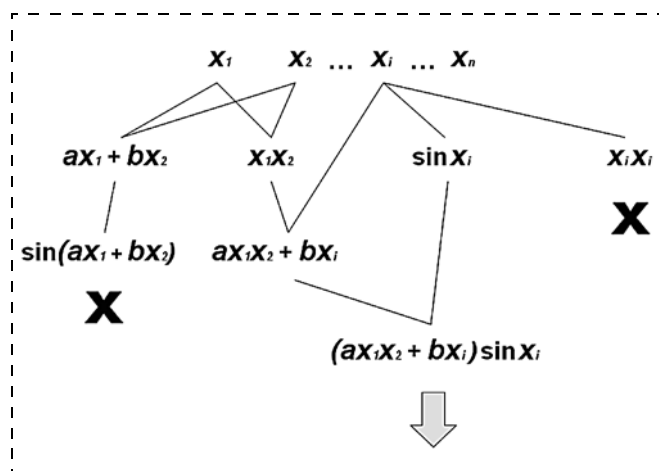


Рис. 6. Пример построения поискового графа при выявлении наилучшего оператора разбиения

В качестве примера на рис. 6 представлен вид поискового графа, построенного с использованием трех шаблонов формирования операторов разбиения:

- $[ax_1 + bx_2] + C > 0$;
- $[x_1x_2] + C > 0$;
- $[\sin(x_1)] + C > 0$.

Применение данного подхода в инженерной практике предполагает ряд упрощений, направленных на сокращение пространства поиска.

Так, для каждой новой дихотомизации дерева граф поиска не перестраивается от основания, а модифицируется путем удаления всех тех узлов, чья полезность ниже, чем у хотя бы одного из родительских.

Все операторы разбиения, выявляемые в процессе поиска, оцениваются по критерию общей полезности. Поиск новых разбиений осуществляется путем случайного выбора и комбинирования операторов (из априорно оговоренного набора) с вероятностью, пропорциональной оценке их полезности.

Процесс поиска завершается по достижении определенной нижней границы прироста информации.

Программно-алгоритмическая реализация процедуры глубинного анализа данных на основе метода построения деревьев классификации может служить конструктивной базой для создания контура интеллектуальной обратной связи в составе самообучающихся систем управления автономными роботами, действующими в условиях априорной неопределенности.

Использование средств и методов глубинного анализа данных для организации процессов самообучения автономных мобильных роботов, действующих в условиях неопределенности

Главной целью организации процессов самообучения интеллектуальных систем управления автономными роботами является повышение уровня их адаптивности к неопределенным условиям среды функционирования.

Так, например, очевидно, что интеллектуальная система управления автономного мобильного робота в общем случае должна обеспечивать прокладку оптимального в некотором смысле маршрута его целенаправленного перемещения. При этом (в зависимости от постановки решаемой задачи) карта местности, в которой функционирует робот, может считаться известной или формироваться непосредственно в процессе его движения на глубину, определяемую дальностью действия бортового комплекса информационно-измерительных средств. В любом из этих вариантов фактические показатели проходимости тех или иных участков местности, зависящие не только от характера подстилающей поверхности и типа грунта, но и от воздействия погодных и климатических, а также суточных и сезонных факторов, необходимо рассматривать в качестве априорно неопределенных параметров, существенно влияющих на выбор формируемого маршрута и его реализуемость.

Следует отметить, что оценки характеристик проходимости робота на различных типах грунтов могут вычисляться на основе косвенных данных, собираемых непосредственно по ходу его движения и связанных, например, с различием задаваемой и фактической скоростей движения платформы.

Одновременная фиксация визуально наблюдаемых параметров окружающей обстановки создает предпосылки для попыток установления закономерностей между цветовыми характеристиками подстилающей поверхности и оценками проходимости соответствующего участка маршрута.

Формирование подобных знаний в процессе самообучения автономного мобильного робота на основе анализа накапливаемых данных позволяет обеспечить оперативное прогнозирование и учет оценок проходимости отдельных участков местности при планировании маршрута движения.

Проведенные модельные эксперименты полностью подтверждают возможность и целесообразность реализации механизмов самообучения в контуре интеллектуальной обратной связи системы управления автономным мобильным роботом. Как показано на рис. 7, обобщенная структура такой системы включает в свой состав следующие основные элементы:

- подсистему планирования перемещений робота в заданную целевую точку;
- информационно-измерительную подсистему, обеспечивающую контроль за параметрами состояния робота и среды его функционирования;
- базу данных о состоянии робота и его внешней среды за весь период функционирования;
- карту местности, отражающую (с той или иной степенью адекватности) особенности и конфигурацию среды функционирования автономного робота;
- подсистему самообучения, обеспечивающую формирование новых знаний, обобщающих опыт функционирования робота;
- базу знаний о закономерностях, найденных по результатам самообучения.

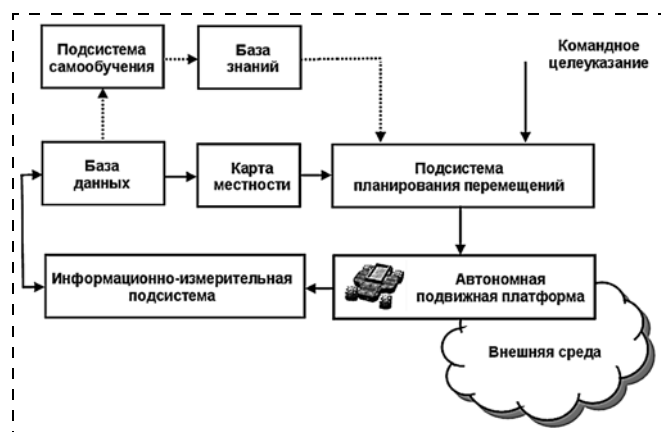


Рис. 7. Обобщенная структура интеллектуальной системы управления автономного мобильного робота

Подсистема планирования целенаправленных перемещений робота построена на основе программной реализации известного алгоритма D* [30, 31], обеспечивающего возможность учета требований по минимизации стоимости формируемого маршрута (в смысле его протяженности или проходимости) при наличии как полностью известной карты, так и уточняемой в процессе движения.

В свою очередь, информационно-измерительная подсистема включает в свой состав средства навигации (для определения параметров текущего состояния мобильной платформы), телекамеру (для наблюдения внешней обстановки) и тактильные датчики (для контроля столкновений с объектами внешней среды, выступающих в качестве препятствий).

Подсистема самообучения объединяет в своем составе программно-алгоритмические средства глубинного анализа данных, выполняемого в соответствии с методом построения деревьев классификации.

Постановка серии модельных экспериментов по оценке эффективности применения средств самообучения в целях повышения адаптивных возможностей системы управления автономным мобильным роботом, действующим в условиях неопределенности, определяется следующими основными положениями:

- средой функционирования робота является местность, отдельные участки которой характеризуются различной окраской и проходимостью;
- карта местности считается априорно неизвестной, но подлежит постоянному уточнению, предполагающему отображение участков местности, которые наблюдаются в области видимости бортовой телекамеры робота в процессе его движения;
- карта местности считается априорно неизвестной, но подлежит постоянному уточнению с отображением участков местности, наблюдаемых бортовой телекамерой робота в процессе его движения;
- фактическая скорость движения робота по маршруту изменяется пропорционально показателям проходимости соответствующих участков местности;
- оценки проходимости отдельных участков местности вычисляются по различию задаваемой и фактической скоростей движения робота;
- факт столкновения с непроходимым элементом ландшафта подтверждается срабатыванием тактильного датчика;
- параметры окраски и проходимости различных участков местности сохраняются в базе данных для последующего анализа и классификации в составе подсистемы самообучения;
- классификация, оперативно сформированная в процессе самообучения, может быть использована для прогноза показателей проходимости наблюдаемых участков местности на очередном этапе прокладки маршрута;

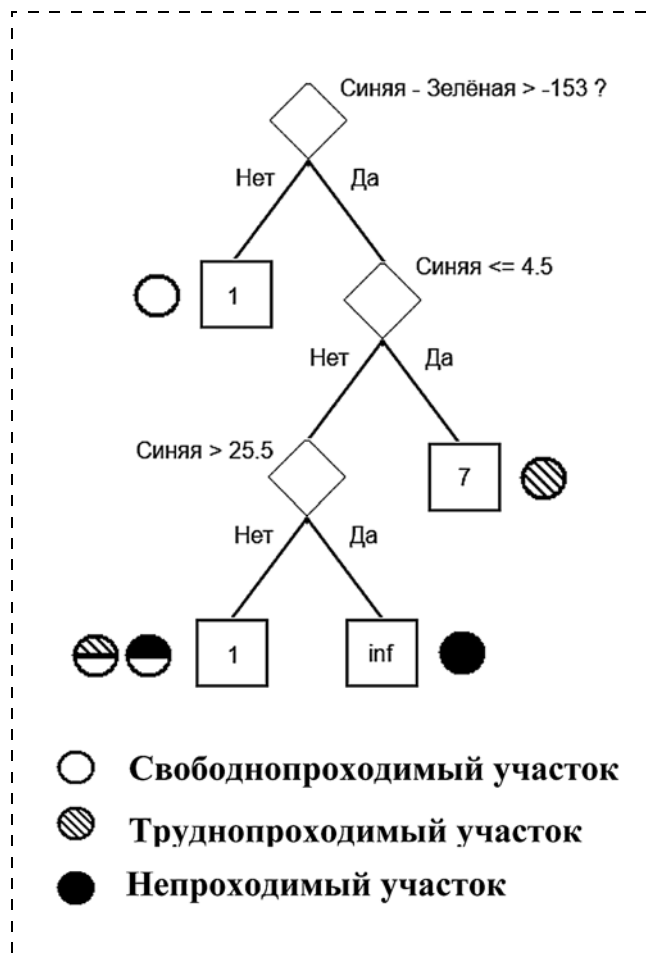


Рис. 9. Дерево классификации участков рельефа местности по их проходимости, построенное по результатам самообучения автономного мобильного робота

- каждый из экспериментов серии проводится двукратно с подключением и отключением контура самообучения соответственно.

На рис. 8 (см. третью сторону обложки) приведены фрагменты одного из экспериментов по моделированию целенаправленных перемещений автономного мобильного робота в условиях сложного рельефа с участками различной проходимости.

Продукционные правила (рис. 8, з), условная часть которых содержит параметры окраски наблюдаемых участков местности (в терминах кодирования изображений в формате RGB, где отдельно взятая точка характеризуется интенсивностью красной, зеленой и синей составляющих со значениями каждой из диапазона $[0, 255]$), а следственная часть указывает на соответствующую оценку проходимости, могут быть представлены в виде дерева классификации (рис. 9) и в своей совокупности образуют набор знаний, сформированных в процессе функционирования робота по ходу его самообучения.

Результаты моделирования убедительно свидетельствуют о том, что обобщение опыта, приобретаемого на начальных этапах движения, позволяет обеспечить активную адаптацию робота к особенностям рельефа местности на основе привлечения полученных знаний для прокладки дальнейшего маршрута при значительном повышении общих показателей эффективности функционирования (рис. 10, а–д).

Особую актуальность вопросы самообучения приобретают для автономных роботов, действующих в условиях неопределенности в составе многоагентных группировок. В этом случае автономные агенты, обеспечивающие выполнение общей прикладной

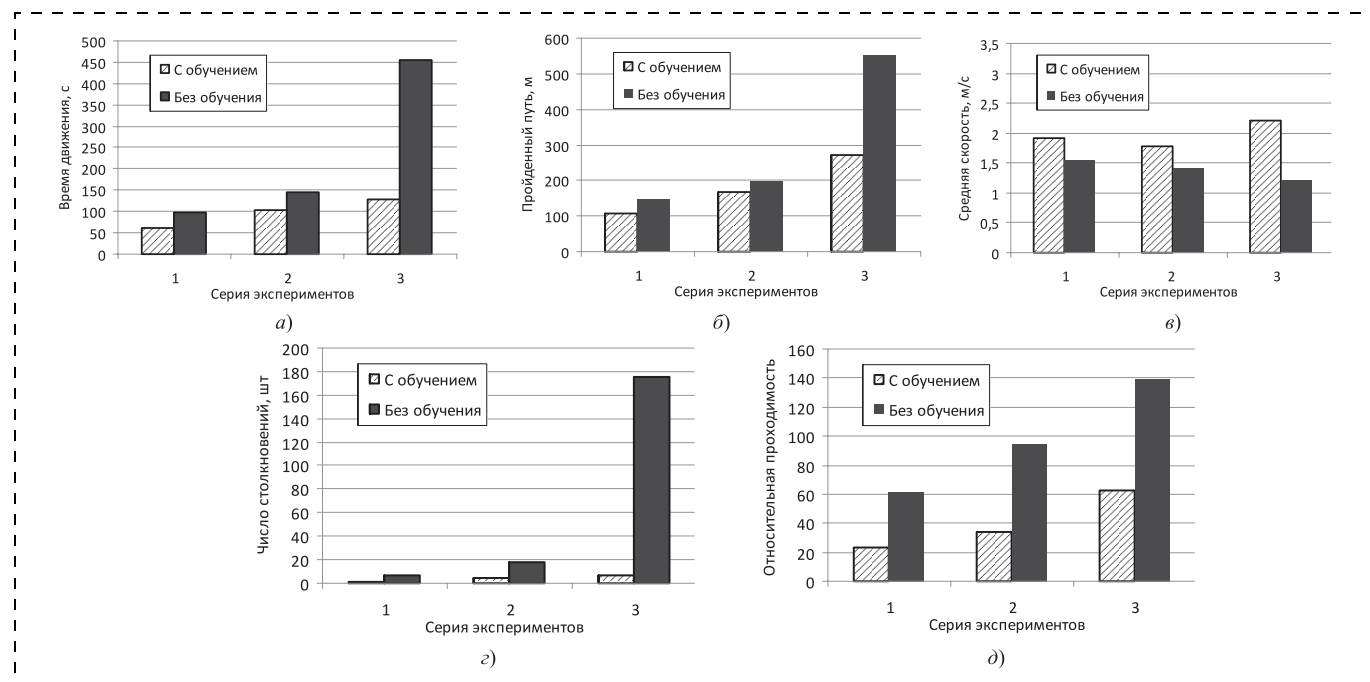


Рис. 10. Экспериментальные оценки эффективности применения средств самообучения для адаптации автономного мобильного робота к априорно неопределенным характеристикам проходимости среды функционирования

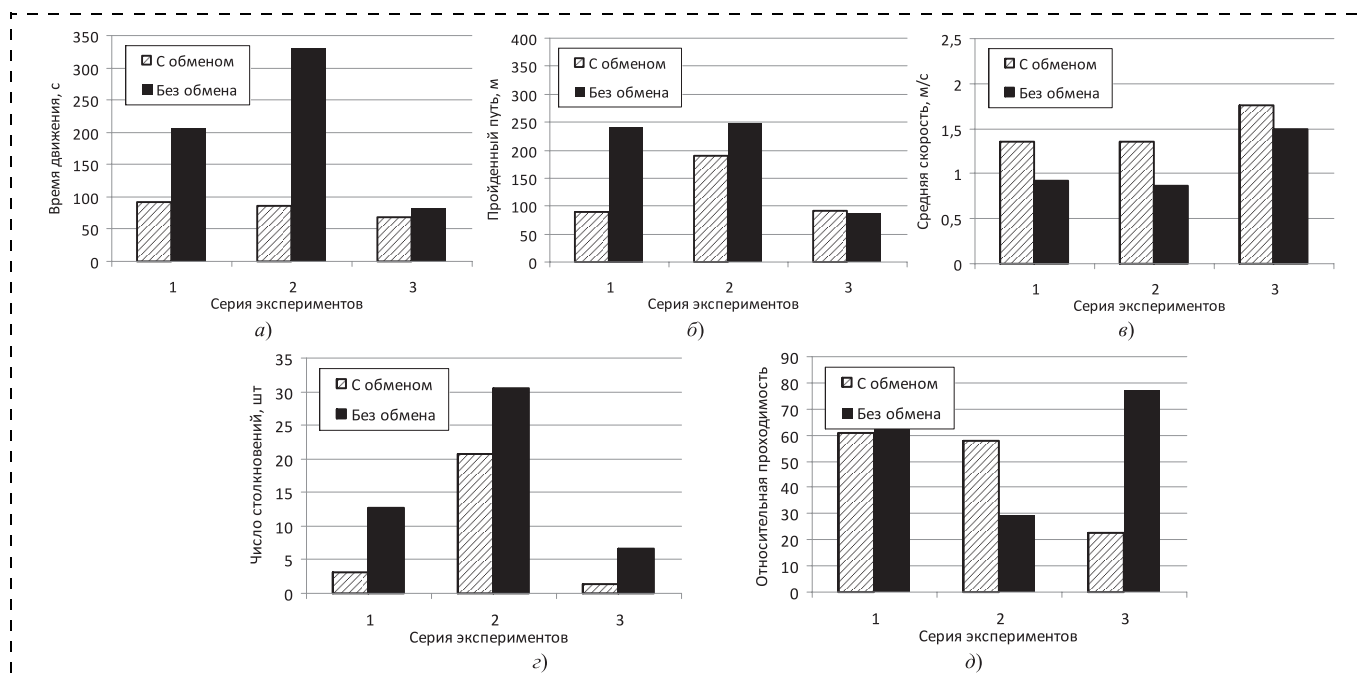


Рис. 11. Экспериментальные оценки эффективности применения средств самообучения для адаптации автономных мобильных роботов к априорно нераспределенным характеристикам проходимости среды функционирования на основе взаимного обмена знаниями

задачи, могли бы осуществлять взаимный обмен знаниями, накапливаемыми независимо друг от друга.

Подобная постановка предполагает глубинный анализ целого ряда разрозненных наборов опытных данных и формирование деревьев классификации. При этом каждому из деревьев ставится в соответствие некоторое значение полезности, увеличиваемое за выдачу верного результата и уменьшаемое при неверном ответе.

Данная оценка может быть использована в качестве универсального показателя, определяющего целесообразность давнейшей модификации дерева, а также его рекомбинации с другими.

Как показано на рис. 11, а–д, результаты предварительных экспериментов подтверждают эффективность применения такой методологии организации процессов самообучения, при которой автономные роботы, действующие в составе многоагентной группировки, осуществляют взаимный обмен знаниями о проходимости различных типов участков местности.

Заключение

Материалы данной статьи наглядно свидетельствуют о возможности разработки и целесообразности привлечения средств самообучения в целях существенного повышения эффективности функционирования автономных мобильных роботов в условиях априорно неизвестной местности с участками различной проходимости.

Практическая реализация предложенного подхода к созданию интеллектуальных систем управления автономными мобильными роботами с са-

мообучением на базе формирования деревьев классификации предполагает необходимость фундаментальных исследований по целому ряду принципиально важных вопросов, главными из которых являются:

- рациональная организация баз данных для хранения накапливаемой сенсорной информации в составе интеллектуальных самообучающихся систем управления;
- механизмы построения ассоциативной памяти для формирования обобщенных образов наблюдаемых объектов, ситуаций и явлений на основе комплексного применения технологии нейросетевых структур;
- обобщенные критерии целесообразности функционирования интеллектуальных систем.

Список литературы

1. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Крюченков Е. Н., Кучерский Р. В., Диане С. А. К. Мультиагентные робототехнические системы: примеры и перспективы применения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 2. С. 22–32.
2. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П. Принципы построения и проблемы разработки мультиагентных робототехнических систем // Мехатроника, автоматизация, управление, 2012. № 3. С. 11–16.
3. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Крюченков Е. Н., Кучерский Р. В., Худак Ю. И. Модели и алгоритмы планирования действий и распределения заданий в мультиагентных робототехнических системах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 5. С. 44–50.
4. Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Диане С. А. К. Способы представления знаний и особенности функционирования мультиагентных робототехнических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 1. С. 36–39.

5. Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Диане С. А. К., Трипольский П. Э., Карпов С. А. Модели и алгоритмы оценки численности состава мультиагентных робототехнических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 3. С. 20—23.
6. Манько С. В., Александрова Р. И., Диане С. А. К. Человечно-машинный интерфейс для мультиагентных робототехнических систем // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 3. С. 183—193.
7. Автоматизация синтеза и обучение интеллектуальных систем автоматического управления / Под ред. И. М. Макарова, В. М. Лохина. М.: Наука, 2009. 228 с.
8. Николенко С. И., Тулупьев А. Л. Самообучающиеся системы. М.: МЦНМО, 2009. 288 с.
9. Sutton R., Barto A. Reinforcement Learning: An Introduction. Cambridge: MIT Press, 1998. 432 p.
10. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И. Д. Рудинского. М.: Горячая линия — Телеком, 2006. 452 с.
11. Люгер Дж. Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем: Пер. с англ. М.: Издательский дом Вильямс, 2003. 864 с.
12. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход / Пер. с англ. и ред. К. А. Птицына. 2-е изд. М.: Издательский дом Вильямс, 2007. 1408 с.
13. DARPA LAGR Program. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/DARPA_LAGR_Program
14. Probabilistic Programming for Advancing Machine Learning (PPAML). URL: <http://www.fbo.gov/utills/view?id=1728bcabdd35609b662d0284e2665f76>
15. Probabilistic Programming for Advancing Machine Learning (PPAML). URL: <http://www.fbo.gov/utills/view?id=a7bdf07d124ac2b1dda079de6de2eb78>
16. SOINN robot. URL: <http://haselab.info/research-e.html>
17. Bongard J., Zykov V., Lipson H. Resilient Machines Through Continuous Self-Modeling // Science. 2006. Vol. 314, N 5802. P. 1118—1121
18. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Кадочников М. В. Многозвенные мехатронно-модульные роботы с адаптивной кинематической структурой // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 11. С. 2—11.
19. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Кадочников М. В., Ситников М. С. Использование генетических алгоритмов для автоматического формирования базы знаний интеллектуальной системы управления автономным мобильным роботом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 6. С. 18—22.
20. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Кадочников М. В., Востриков Г. С. Использование генетических алгоритмов в задачах автоматического обучения и самоорганизации интеллектуальных робототехнических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. Приложение. 2008. № 9. С. 2—10.
21. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Кадочников М. В. Технологии обработки знаний в задачах управления автономными мехатронно-модульными реконфигурируемыми роботами // Информационные технологии. Приложение. 2010. № 8. 32 с.
22. Lior Rokach, Oded Maimon. Data mining with decision trees: theory and applications. World Scientific Pub Co Inc., 2008, 244 p.
23. Xindong Wu., Vipin Kumar, J. Ross Quinlan, Joydeep Ghosh, Qiang Yang, Hiroshi Motoda, Geoffrey J. McLachlan, Angus Ng, Bing Liu, Philip S. Yu., Zhi-Hua Zhou, Michael Steinbach, David J. Hand, Dan Steinberg. Top 10 algorithms in data mining // Knowl. Inf. Syst. 2008. 14 (1). P. 1—37.
24. Quinlan J. R. Induction of Decision Trees // Machine Learning. Kluwer Academic Publishers, 1986. P. 81—106.
25. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication // Bell System Technical Journal. 1948. July & October, 27. P. 379—423, 623—656.
26. Mitchell T. M. Machine Learning. The Mc-Graw-Hill Companies, Inc. 1997, 414 p.
27. Rayi Chang, Chia-Yen Lo, Wen-De Su, Jen-Chieh Wang. Query-Based Learning Decision Tree and its Applications in Data Mining // Proceedings of the 2006 Joint Conference on Information Sciences, JCIS 2006, Kaohsiung, Taiwan, ROC, October 8—11, 2006. doi:10.2991/jcis.2006.49
28. Kokol P., Mernik M., Završnik J., Kancler K., Malčić I. Decision trees based on automatic learning and their use in cardiology // Journal of Medical Systems. Vol. 18, Iss. 4. P. 201—206.
29. Dash M., Liu H. Feature Selection for Classification // Intelligent Data Analysis — An International Journal. Elsevier. 1997. Vol. 1, N. 3. P. 131—156.
30. Stentz A. Optimal and Efficient Path Planning for Partially-Known Environments // Proc. of the International Conference on Robotics and Automation. 1994, May. P. 3310—3317.
31. Stentz A. The Focussed D* Algorithm for Real-Time Replanning // Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence. August 1995. P. 1652—1659.

Intelligent Feedback, Knowledge Processing and Self Learning in the Control Systems of the Autonomous Robots and Multi-Agent Robotic Groups

V. M. Lokhin, cpd@mirea.ru, S. V. Manko ✉, R. I. Alexandrova, S. A. K. Diane, A. S. Panin,
MSTU MIREA, Moscow, 119 454, Russian Federation

Corresponding author: Manko Sergey V., D. Sc., Professor,
MSTU MIREA, Moscow, 119 454, Russian Federation,
e-mail: cpd@mirea.ru

Received on February 20, 2015

Accepted March 27, 2015

The article is devoted to analysis of various approaches aimed to ensure adaptive properties of the automatic control systems designed for maintenance of the demanded reliability and functioning quality in the presence of disturbances and uncertainty factors. A review is provided of the development of the creation principles for the automatic control systems — from organization of an internal feedback, up to creation of intelligent feedback contours with self-training mechanisms. Examples of various robots equipped with intelligent self-learning control systems are presented. A list of tasks of self-learning of the intelligent control systems is presented both for the autonomous robots and for the multi-agent robot systems. A generalized structure of a control system of the autonomous mobile robots is offered based on the intelligent feedback as means of new knowledge formation. Knowledge formation is possible in a self-learning mode on the basis of processing of the accumulated sensory information. The main problems with creation of the intelligent self-learning control systems are discussed. It is shown that one of the most perspective approaches to realization of the self-learning process in the intelligent control systems of the autonomous robots and multi-robot systems is related to the method of classification of tree formation. The article gives an example of a

practical solution to the self-learning problem of the autonomous mobile robots. The solution is based on the automatic knowledge formation of the passability characteristics of the surface underlying a robot. The results of a complex modeling are presented, which testify to the expediency and efficiency of incorporation of the self-learning methods in the structure of a mobile robot intelligent onboard control system for improvement of its adaptation properties. The prospects of the self-learning processes are described for the autonomous robots operating in the structure of the multi-agent systems. As a prove experimental estimates of the efficiency are given for application of the self-learning methods aimed at adaptation of the autonomous mobile robots under conditions of environmental uncertainty on the basis of a mutual exchange of the terrain passability knowledge.

Keywords: autonomous robot, multi-agent robotic system, intelligent control system, intelligent feedback, self-learning, classification trees

For citation:

Lokhin V. M., Manko S. V., Alexandrova R. I., Diane S. A. K., Panin A. S. Intelligent Feedback, Knowledge Processing and Self Learning in the Control Systems of the Autonomous Robots and Multi-Agent Robotic Groups, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 8, pp. 545–555.

DOI: 10.17587/mau.16.545-555

References

1. **Makarov I. M., Lokhin V. M., Man'ko S. V., Romanov M. P., Kryuchenkov E. N., Kucherskii R. V., Diane S. A.** Mul'tiagentnye robototekhnicheskie sistemy: primery i perspektivy primeneniya (Multi-agent robotic systems: examples and application prospects), *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2012, no. 2, pp. 22–32 (in Russian).
2. **Makarov I. M., Lokhin V. M., Man'ko S. V., Romanov M. P.** Printsipy postroeniya i problemy razrabotki mul'tiagentnykh robototekhnicheskikh sistem (Principles and problems of development of multi-agent robotic systems), *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2012, no. 3, pp. 11–16 (in Russian).
3. **Makarov I. M., Lokhin V. M., Man'ko S. V., Romanov M. P., Kryuchenkov E. N., Kucherskii R. V., Khudak Yu. I.** Modeli i algoritmy planirovaniya deistvii i raspredeleniya zadaniy v mul'tiagentnykh robototekhnicheskikh sistemakh *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2012, no. 5, pp. 44–50 (in Russian).
4. **Lokhin V. M., Man'ko S. V., Romanov M. P., Diane S. A. K.** Sposoby predstavleniya znaniy i osobennosti funktsionirovaniya mul'tiagentnykh robototekhnicheskikh sistem (Methods of knowledge representation and the peculiarities of functioning of multi-agent robotic systems), *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2014, no. 1, pp. 36–39 (in Russian).
5. **Lokhin V. M., Man'ko S. V., Romanov M. P., Diane S. A. K., Tripol'skii P. E., Karpov S. A.** Modeli i algoritmy otsenki chislennosti sostava mul'tiagentnykh robototekhnicheskikh sistem (Models and algorithms for estimating abundance of multi-agent robotic systems), *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2014, no. 3, pp. 20–23 (in Russian).
6. **Man'ko S. V., Aleksandrova R. I., Diane S. A. K.** Cheloveko-mashinnyi interfeis dlya mul'tiagentnykh robototekhnicheskikh sistem (Man-machine interface for multi-agent robotic systems), *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2014, no. 3, pp. 183–193 (in Russian).
7. **Makarov I. M., Lokhin V. M.** ed. Avtomatizatsiya sinteza i obucheniye intellektual'nykh sistem avtomaticheskogo upravleniya (Automation of synthesis and machine learning of intelligent systems of automatic control), Moscow, Nauka, 2009, 228 p. (in Russian).
8. **Nikolenko S. I., Tulup'ev A. L.** Samoobuchayushchiesya sistemy (Self-learning systems), Moscow, MTsNMO, 2009, 288 p.
9. **Sutton R., Barto A.** Reinforcement Learning: An Introduction, Cambridge, MIT Press, 1998, 432 p.
10. **Rutkovskaya D., Pilin'skii M., Rutkovskii L.** Neironnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy (Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems), Moscow, Goryachaya liniya — Telekom, 2006, 452 p. (in Russian).
11. **Lyuger Dzh. F.** Iskusstvennyi intellekt: strategii i metody resheniya slozhnykh problem (Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving), Moscow, Izdatel'skii dom Vil'yams, 2003, 864 p.
12. **Rassel S., Norvig P.** Iskusstvennyi intellekt: sovremennyy podkhod (Artificial Intelligence: A Modern Approach), Moscow, Izdatel'skii dom Vil'yams, 2007, 1408 p. (in Russian).
13. **DARPA LAGR Program**, available at: http://en.wikipedia.org/wiki/DARPA_LAGR_Program

14. **Probabilistic Programming for Advancing Machine Learning (PPAML)**, available at: <http://www.fbo.gov/utills/view?id=1728bcabdd35609b662d0284e2665f76>

15. **Probabilistic Programming for Advancing Machine Learning (PPAML)**, available at: <http://www.fbo.gov/utills/view?id=a7bdf07d124ac2b1dda079de6de2eb78>

16. **SOINN robot**, available at: <http://haselab.info/research-e.html>

17. **Bongard J., Zykov V., Lipson H.** Resilient Machines Through Continuous Self-Modeling, *Science*, 2006, vol. 314, no. 5802, pp. 1118–1121.

18. **Makarov I. M., Lokhin V. M., Man'ko S. V., Romanov M. P., Kadochnikov M. V.** Mnogozvennyye mekhatronno-modul'nye roboty s adaptivnoi kinematicheskoi strukturoi (Multilink-mechatronic modular robots with adaptive kinematic structure), *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2006, no. 11, pp. 2–11 (in Russian).

19. **Makarov I. M., Lokhin V. M., Man'ko S. V., Kadochnikov M. V., Sitnikov M. S.** Ispol'zovanie geneticheskikh algoritmov dlya avtomaticheskogo formirovaniya bazy znaniy intellektual'noi sistemy upravleniya avtonomnym mobil'nyim robotom (Using the genetic algorithms to automatic generation a knowledge base intelligent control system of autonomous mobile robot), *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2008, no.6, pp. 18–22 (in Russian).

20. **Makarov I. M., Lokhin V. M., Man'ko S. V., Kadochnikov M. V., Vostrikov G. S.** Ispol'zovanie geneticheskikh algoritmov v zadachakh avtomaticheskogo obucheniya i samoorganizatsii intellektual'nykh robototekhnicheskikh sistem (Using the genetic algorithms in problems of machine learning and self-organization of intelligent robotic systems), *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. Prilozhenie*, 2008, no. 9, pp. 2–10 (in Russian).

21. **Makarov I. M., Lokhin V. M., Man'ko S. V., Romanov M. P., Kadochnikov M. V.** Tekhnologii obrabotki znaniy v zadachakh upravleniya avtonomnymi mekhatronno-modul'nymi rekonfiguriruemymi robotami (Knowledge processing technologies in control problems of autonomous mechatronic-modular configurable robots), *Informatsionnye tekhnologii. Prilozhenie*, 2010, no. 8, 32 p. (in Russian).

22. **Lior Rokach, Oded Maimon.** Data mining with decision trees: theory and applications, World Scientific Pub Co Inc., 2008, 244 p.

23. **Xindong Wu., Vipin Kumar, J. Ross Quinlan, Joydeep Ghosh, Qiang Yang, Hiroshi Motoda, Geoffrey J. McLachlan, Angus Ng, Bing Liu, Philip S. Yu., Zhi-Hua Zhou, Michael Steinbach, David J. Hand, Dan Steinberg.** Top 10 algorithms in data mining, *Knowl. Inf. Syst.*, 2008, 14 (1), pp. 1–37.

24. **Quinlan J. R.** Induction of Decision Trees, *Machine Learning*, Kluwer Academic Publishers, 1986, pp. 81–106.

25. **Shannon C. E.** A Mathematical Theory of Communication, *Bell System Technical Journal*, 1948, July & October, 27, pp. 379–423, 623–656.

26. **Mitchell T. M.** Machine Learning, The Mc-Graw-Hill Companies, Inc. 1997, 414 p.

27. **Rayi Chang, Chia-Yen Lo, Wen-De Su, Jen-Chieh Wang.** Query-Based Learning Decision Tree and its Applications in Data Mining, *Proceedings of the 2006 Joint Conference on Information Sciences, JCIS 2006, Kaohsiung, Taiwan, ROC*, October 8–11, 2006. doi:10.2991/jcis.2006.49

28. **Kokol P., Mernik M., Završnik J., Kancler K., Malčić I.** Decision trees based on automatic learning and their use in cardiology, *Journal of Medical Systems*, vol. 18, iss. 4, pp. 201–206.

29. **Dash M., Liu H.** Feature Selection for Classification, *Intelligent Data Analysis — An International Journal*, Elsevier, 1997, vol. 1, no. 3, pp. 131–156.

30. **Stentz A.** Optimal and Efficient Path Planning for Partially-Known Environments, *Proc. of the International Conference on Robotics and Automation*, 1994, May, pp. 3310–3317.

31. **Stentz A.** The Focussed D* Algorithm for Real-Time Replanning, *Proc. of the International Joint Conference on Artificial Intelligence*, August 1995, pp. 1652–1659.

Ю. В. Загашвили, д-р техн. наук, проф., ген. директор, y.zagashvili@yandex.ru,
Г. Б. Савченко, науч. сотр., Ю. Н. Филимонов, канд. техн. наук, проф., гл. конструктор,
ООО "ВТР", Санкт-Петербург

Идентификация статических характеристик газогенератора синтез-газа

Предложена методика идентификации статических характеристик газогенераторов синтез-газа, позволяющая получить зависимости выходных переменных (массовых расходов компонентов синтез-газа — водорода и монооксида углерода) от входных переменных — массовых расходов углеводородного горючего и окислителя. Методика иллюстрируется примером расчета характеристик газогенератора типа высокотемпературного реактора, в котором реализуется технология парциального окисления дизельного топлива кислородом.

Ключевые слова: газогенератор, камера сгорания, парциальное окисление, углеводородное горючее, окислитель, синтез-газ, водород, термодинамические расчеты, концентрации компонентов, идентификация, статические характеристики, модели приращений

Введение

Синтез-газ, представляющий собой смесь водорода H_2 и монооксида углерода CO , используется в качестве сырья для химической промышленности или как промежуточный продукт в технологиях переработки природных и попутных газов нефтяных месторождений в товарные углеводороды, например моторные топлива. Проблемам совершенствования традиционных и создания новых технологий получения синтез-газа посвящены многочисленные исследования и разработки [1].

Одной из наиболее перспективных технологий является парциальное окисление углеводородного горючего (УВГ) в высокоэнергоемких, малогабаритных, управляемых газогенераторах — высокотемпературных реакторах (ВТР) [2—6]. ВТР является основным узлом установок получения синтез-газа, в котором происходит термическое разложение исходного УВГ и цепь химических реакций с образованием синтез-газа и балластных газов (двуокиси углерода CO_2 , водяного пара H_2O , оксидов азота). Поэтому автоматическое управление режимами работы ВТР является важным способом повышения эффективности технологического процесса получения синтез-газа. Оно позволяет обеспечить многорежимность установок, квазиоптимальность технологических процессов в условиях изменяющихся характеристик УВГ и нестационарности собственных параметров установки, возможность программного изменения производительности и др.

Для решения перечисленных задач необходимо знание математических моделей процессов в реакторах, связывающих входные управляющие воздей-

ствия с выходными управляемыми переменными. Однако традиционно используемые проектировщиками математические модели — уравнения равновесия (диссоциации), уравнения материального баланса (сохранения вещества), уравнения Дальтона и уравнения сохранения энергии — описывают равновесные термодинамические процессы в реакторах [7]. На их основе рассчитывают параметры режимов процессов горения, концентрации компонентов водородсодержащего газа на выходе реакторов, необходимую производительность реакторов по синтез-газу, номинальные значения массовых расходов компонентов подачи (горючего, окислителя, воды). Но эти модели не позволяют непосредственно проводить синтез законов управления технологическими процессами и моделирование режимов работы химических реакторов.

Поэтому целью настоящего исследования является разработка методики структурной и параметрической идентификации ВТР и получение зависимостей, связывающих массовые расходы компонентов синтез-газа с массовыми расходами компонентов подачи.

Описание объекта исследования

ВТР является управляемым химическим реактором и представляет собой охлаждаемую модульную конструкцию, состоящую из следующих основных элементов: блока подачи горючего и окислителя, устройства зажигания, камеры сгорания (КС), блока впрыска воды, испарительной камеры (ИК), блока очистки от твердой фазы, блока автоматики [3—6].

Входными управляющими воздействиями для ВТР являются массовые расходы УВГ и окислителя, подаваемые в КС, а также массовый расход воды, подаваемой в ИК. Выходными управляемыми переменными являются массовые расходы H_2 и CO , отношение объемных концентраций водорода к монооксиду углерода C^{H_2}/C^{CO} в получаемом синтез-газе и его массовый расход на выходе ВТР.

Заметим, что в ИК за счет впрыска воды происходит только охлаждение водородсодержащего газа, поступающего из КС. При этом массовые расходы компонентов собственно синтез-газа (CO , H_2) не изменяются. Поэтому количественные и качественные параметры синтез-газа идентичны и для КС, и для ВТР в целом.

В качестве УВГ могут использоваться любые жидкие и газообразные углеводороды, а в качестве окислителя — кислород или кислород воздуха. Подача горючего, окислителя и воды осуществляется системами подачи компонентов, исполнительными элементами которых являются расходомеры-регуляторы (РХМ), обеспечивающие плавное и точное регулирование массовых расходов компонентов.

Основными технологическими режимами работы ВТР являются: режим стабилизации — автоматическое поддержание заданных массовых расходов горючего, окислителя и их соотношения, режим оптимизации — автоматическое регулирование массовых расходов горючего, окислителя и их соотношения для обеспечения требуемого количественного и качественного состава синтез-газа.

Методика идентификации

Исходными данными для проведения исследований являются химический состав применяемого УВГ и заданный диапазон изменения параметров рабочего режима в камере сгорания ВТР, который уточняется на стадии подготовки технического задания на проектирование ВТР в зависимости от целевого назначения синтез-газа.

На *первом этапе* идентификации проводится серия многофакторных термодинамических расчетов, заключающихся в расчете объемных и массовых концентраций компонентов в водородсодержащем газе на выходе КС (H_2 , CO , CO_2 , H_2O , оксидов азота), температуры газа и других вспомогательных характеристик в широком диапазоне изменения параметров рабочего режима ВТР и химического состава горючего.

Расчеты проводятся с помощью пакета прикладных программ, разработанного на основе данных и методик, изложенных в справочнике [7].

На *втором этапе* по результатам анализа проведенных термодинамических расчетов обосновывается выбор номинального режима парциального окисления. Прежде всего, из условий предотвращения сажеобразования (К-фазы) и обеспечения требуемого соотношения компонентов синтез-газа

определяется основной технологический параметр — коэффициент избытка окислителя α . Теоретическое значение коэффициента рассчитывается по формуле

$$\alpha = m^{OK}/(m^F K_{m0}), \quad (1)$$

где K_{m0} — стехиометрическое значение соотношения компонентов для заданной пары окислитель — УВГ; m^{OK} — массовый расход окислителя; m^F — массовый расход углеводородного горючего.

На этом же этапе выбираются и другие параметры номинального режима: давление в КС, температура подогрева УВГ и окислителя, степень увлажнения УВГ, массовые расходы подачи компонентов, в том числе номинальный массовый расход подачи воды в ИК для обеспечения заданной температуры водородсодержащего газа на выходе ВТР.

На *третьем этапе* проводятся повторные термодинамические расчеты, но в более узком диапазоне — не более 10 % от номинальных значений — изменения параметров, оказывающих существенное влияние на режим парциального окисления УВГ.

На *четвертом этапе* проводится собственно структурная и параметрическая идентификация статических характеристик ВТР в окрестностях номинального технологического режима, а именно:

- идентификация зависимостей, связывающих массовые расходы компонентов водородсодержащего газа на выходе КС с массовыми расходами горючего и окислителя на входе в КС;
- идентификация зависимости температуры водородсодержащего газа на выходе КС от параметров α и входных управляющих воздействий.

Результаты расчетов, полученные на третьем этапе, позволяют перейти к приращением соответствующих концентраций и температуры в окрестности параметров выбранного номинального режима работы ВТР и далее использовать их в качестве исходных данных для нахождения искомых статических характеристик путем применения стандартных процедур определения эмпирических зависимостей [8].

Пример

Рассмотрим применение изложенной методики к задаче определения статических характеристик ВТР для компонентов подачи кислород — дизельное топливо. Такая пара компонентов может использоваться, например, для получения синтез-газа с последующей каталитической конверсией CO в установках по производству водорода [9].

В соответствии с методикой на первом этапе проведены численные эксперименты в широком диапазоне параметров режима работы ВТР — соотношения компонентов подачи, давлений в КС, температур подогрева и степени увлажнения компонентов. Фрагменты термодинамических расчетов приведены на рис. 1—4.

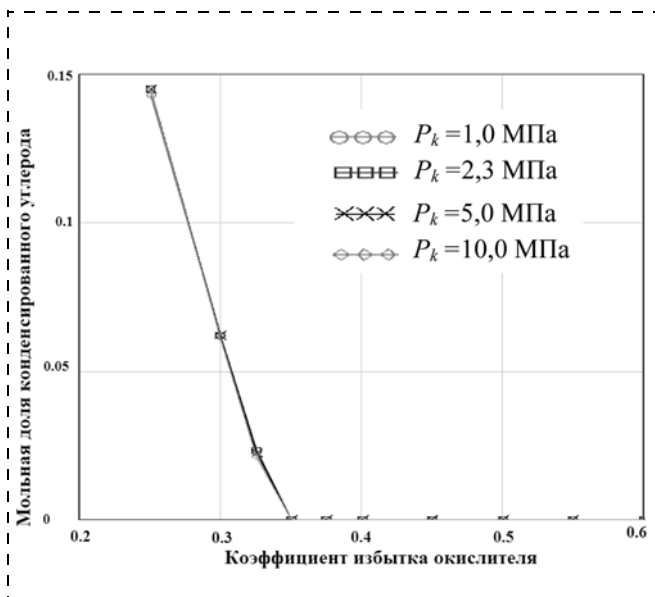


Рис. 1. Зависимость мольной доли конденсированного углерода от коэффициента избытка окислителя для топливной пары кислород—дизельное топливо

На втором этапе проводится разведочный анализ данных. Из графиков, приведенных на рис. 1—4, следует, что в диапазоне изменения $0,35 < \alpha < 0,5$ объемные концентрации компонентов синтез-газа линейно зависят от α и практически не зависят от давления в КС, причем вблизи нижней границы указанного диапазона концентрации компонентов близки к максимальным значениям. Температура водородсодержащего газа на выходе КС в указанном диапазоне α также изменяется линейно и не зависит от давления. Кроме того, выявлено подобие

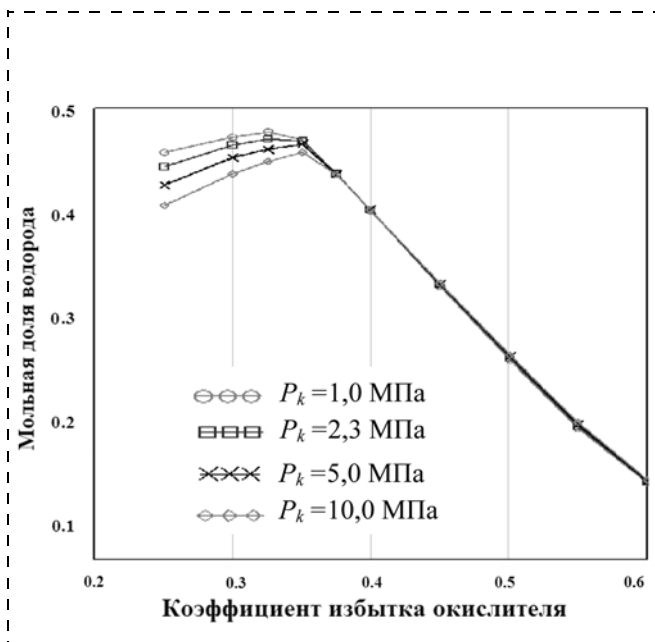


Рис. 2. Зависимость концентрации водорода от коэффициента избытка окислителя для топливной пары кислород—дизельное топливо

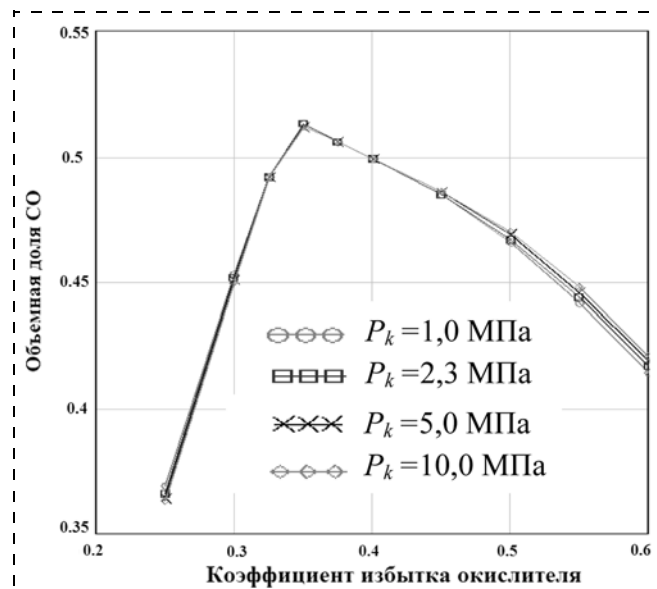


Рис. 3. Зависимость концентрации СО от коэффициента избытка окислителя для топливной пары кислород—дизельное топливо

графиков концентраций компонентов и температуры газа на выходе КС при изменении температуры подогрева горючего и окислителя, а также степени их увлажнения.

При обосновании выбора номинального технологического режима предположим, что целевое назначение синтез-газа — получение водорода. Тогда для максимизации выходов компонентов синтез-газа и предотвращения сажеобразования в соответствии с рис. 1—3 целесообразно выбрать номинальное значение $\bar{\alpha} = 0,4 \pm 0,05$.

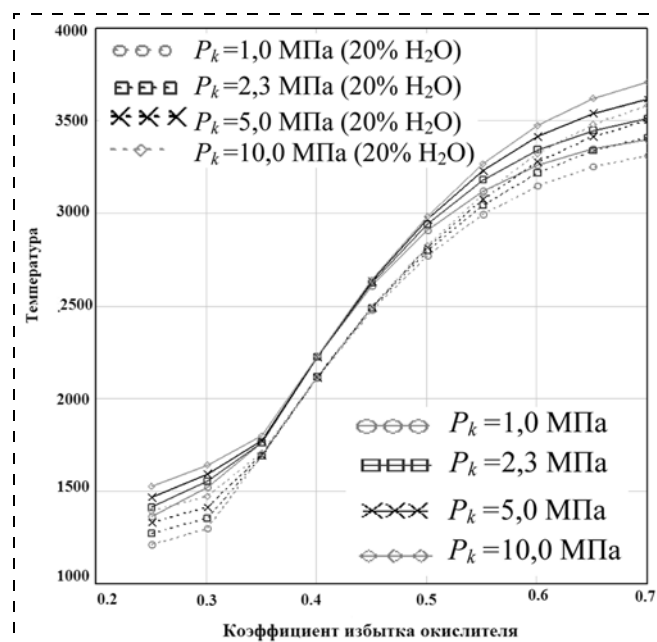


Рис. 4. Зависимость температуры газа в КС от коэффициента избытка окислителя для топливных пар кислород—дизельное топливо, кислород — дизельное топливо — 20 % массовых воды

Выбор давления в КС зависит от дальнейшего использования синтез-газа. Как правило, этот параметр оговаривается в техническом задании на проектирование. При производстве водорода целесообразно выбирать давление в диапазоне от 1,5 до 4,0 МПа для обеспечения работоспособности катализаторов в процессе паровой каталитической конверсии монооксида углерода.

На третьем этапе проведены повторные термодинамические расчеты в окрестности номинального режима при изменении параметра α с шагом 0,01, фрагменты расчетов приведены в *Приложении 1*. В *Приложении 2* приведена таблица приращений соответствующих переменных, составленная на основании данных *Приложения 1*.

Данные о приращениях являются исходными для идентификации семейства характеристик $\Delta m^{H_2} = f(\Delta\alpha)$, $\Delta m^{CO} = f(\Delta\alpha)$, $\Delta(C^{H_2}/C^{CO}) = f(\Delta\alpha)$, $\Delta T = f(\Delta\alpha)$. В качестве иллюстрации одной из возможных вычислительных процедур в *Приложении 2* рассмотрена идентификация зависимости $\Delta m^{CO} = f(\Delta\alpha)$.

Показано, что все искомые характеристики могут быть адекватно описаны линейными моделями вида

$$\Delta m^{H_2} = -0,28\Delta\alpha \text{ при } m^{\Gamma} = 1 \text{ г/с и } \Delta m^{\Gamma} = 0; \quad (2)$$

$$\Delta m^{H_2} = -0,41\Delta\alpha \text{ при } m^{OK} = 1 \text{ г/с и } \Delta m^{OK} = 0; \quad (3)$$

$$\Delta m^{CO} = -1,88\Delta\alpha \text{ при } m^{\Gamma} = 1 \text{ г/с и } \Delta m^{\Gamma} = 0; \quad (4)$$

$$\Delta m^{CO} = -4,73\Delta\alpha \text{ при } m^{OK} = 1 \text{ г/с и } \Delta m^{OK} = 0; \quad (5)$$

$$\Delta(C^{H_2}/C^{CO}) = -1,12\Delta\alpha; \quad (6)$$

$$\Delta T = 8600\Delta\alpha. \quad (7)$$

Формулы (2)—(5) получены по данным таблиц П.1.2, П.1.3 и описывают удельные характеристики, приведенные к единичному массовому расходу горючего или окислителя. Формулы (6), (7) получены по данным таблицы П.1.1.

Для нахождения характеристик конкретного газогенератора с заданной производительностью необходимо ввести масштабные коэффициенты, соответствующие номинальным массовым расходам компонентов подачи. Тогда формулы (2)—(5) принимают вид

$$\Delta m^{H_2} = -0,28\bar{m}^{\Gamma}\Delta\alpha, \text{ при } \Delta m^{\Gamma} = 0, \quad (8)$$

$$\Delta m^{H_2} = -0,41\bar{m}^{OK}\Delta\alpha, \text{ при } \Delta m^{OK} = 0, \quad (9)$$

$$\Delta m^{CO} = -1,88\bar{m}^{\Gamma}\Delta\alpha, \text{ при } \Delta m^{\Gamma} = 0, \quad (10)$$

$$\Delta m^{CO} = -4,73\bar{m}^{OK}\Delta\alpha, \text{ при } \Delta m^{OK} = 0, \quad (11)$$

где $\bar{m}^{\Gamma}$, $\bar{m}^{OK}$ — номинальные массовые расходы горючего (дизтоплива) и окислителя (кислорода).

Характеристики (6)—(11) описывают зависимости искомых выходных переменных от промежуточного параметра — приращения $\Delta\alpha$ — в окрестности номинального $\bar{\alpha}$. Для перехода к входным управляющим переменным воспользуемся выражением (1). Дифференцируя (1), найдем

$$\begin{aligned} \Delta\alpha &= \left(\frac{\partial\alpha}{\partial m^{OK}}\right)\Delta m^{OK} + \left(\frac{\partial\alpha}{\partial m^{\Gamma}}\right)\Delta m^{\Gamma} = \\ &= K_1\Delta m^{OK} + K_2\Delta m^{\Gamma}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $K_1 = 1/(\bar{m}^{\Gamma} K_{m0})$, $K_2 = -\bar{m}^{OK}/[(\bar{m}^{\Gamma})^2 K_{m0}]$.

Проводя промежуточные преобразования выражений (6)—(11) с учетом (12), окончательно получим

$$\Delta m^{H_2} = 0,221\Delta m^{\Gamma} - 0,083\Delta m^{OK}, \quad (13)$$

$$\Delta m^{CO} = 2,550\Delta m^{\Gamma} - 0,558\Delta m^{OK}, \quad (14)$$

$$\Delta(C^{H_2}/C^{CO}) = (0,400\Delta m^{\Gamma} - 0,332\Delta m^{OK})/\bar{m}^{\Gamma}, \quad (15)$$

$$\Delta T = (2550\Delta m^{OK} - 3440\Delta m^{\Gamma})/\bar{m}^{\Gamma}. \quad (16)$$

Важно отметить, что полученные зависимости (13)—(16) инвариантны к положению рабочей точки в области рациональных параметров режима парциального окисления, что следует из проведенных на втором этапе анализа данных термодинамических расчетов.

Рассмотрим пример расчета статических характеристик ВТР, работающего на компонентах дизтопливо — кислород со следующими параметрами номинального режима: $\bar{\alpha} = 0,4$, номинальные расходы подачи компонентов — $\bar{m}^{\Gamma} = 24,335$ г/с, $\bar{m}^{OK} = 33,309$ г/с; давление в КС — 2,5 МПа; номинальный массовый выход водорода — 6,25 г/с; температура газа на выходе КС — 2240 К.

Пусть возмущенное движение характеризуется уменьшением массового расхода окислителя на 5 % и увеличением массового расхода горючего на 7 %. Требуется оценить изменение выходных реакций ВТР.

Согласно (1) найдем $\alpha = m^{OK}/(m^{\Gamma} K_{m0}) = 31,644/(26,038 \cdot 3,375) = 0,360$. По формуле (13) найдем приращение массового расхода водорода к номинальному режиму:

$$\begin{aligned} \Delta m^{H_2} &= 0,221\Delta m^{\Gamma} - 0,083\Delta m^{OK} = \\ &= 0,221 \cdot 1,703 + 0,083 \cdot 1,665 = 0,515 \text{ г/с.} \end{aligned}$$

Из формулы (14)

$$\begin{aligned} \Delta m^{CO} &= 2,550\Delta m^{\Gamma} - 0,558\Delta m^{OK} = \\ &= 2,55 \cdot 1,703 + 0,558 \cdot 1,665 = 5,272 \text{ г/с.} \end{aligned}$$

Согласно (16) найдем изменение температуры газа на выходе КС:

$$\begin{aligned} \Delta T &= (2550\Delta m^{OK} - 3440\Delta m^{\Gamma})/\bar{m}^{\Gamma} = \\ &= (2550 \cdot (-1,665) - 3440 \cdot 1,703)/24,335 = -415 \text{ К.} \end{aligned}$$

Заключение

Разработана методика идентификации газогенераторов синтез-газа, позволяющая определять удельные статические характеристики, связывающие входные управляющие переменные (компоненты подачи — УВГ и окислитель) с выходными переменными (компонентами синтез-газа — водородом и монооксидом углерода) в окрестностях номинального технологического режима. Методика основана на данных предварительных термодинамических расчетов процессов парциального окисления, проводимых для заданной пары исходных компонентов УВГ — окислитель, и последующем применении стандартных процедур структурной и параметрической идентификации.

Получены формулы пересчета, позволяющие масштабировать результаты путем перехода от удельных к фактическим статическим характеристикам в зависимости от заданной производительности газогенератора.

Методика иллюстрируется примером расчета статических характеристик газогенератора синтез-газа типа ВТР, в котором реализуется технология парциального окисления дизельного топлива газообразным кислородом. Показана относительная инвариантность искомых статических характеристик к значительным вариациям параметров режима парциального окисления, что существенно расширяет область применения моделей для управления процессами получения синтез-газа заданного состава.

Список литературы

1. Брагинский О. Б. Мировой нефтегазовый комплекс. М.: Наука, 2004. 605 с.
2. Анискевич Ю. В., Красник В. В., Филимонов Ю. Н. Выбор режимных параметров процесса парциального газофазного окисления метана кислородом воздуха с целью получения синтез-газа требуемого состава // Журнал прикладной химии. 2009. Т. 82, Вып. 8. С. 1335—1341.
3. Устройство для получения синтез-газа. Патент РФ № 2523824.
4. Устройство генератора синтез-газа. Патент РФ № 2535121.
5. Способ получения синтез-газа. Патент РФ № 2521377.
6. Реактор для получения непредельных углеводородов, преимущественно этилена. Патент РФ № 2369431.
7. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания / Под ред. В. П. Глушко. Т. 1. М.: ВИНТИ АН СССР, 1971. 263 с.
8. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул. М.: Высшая шк., 1988. — 239 с.
9. Савченко Г. Б. Способ получения водорода на основе критических технологий // Насосы. Турбины. Системы. 2014. № 1. С. 21—26.

Приложение 1

Расчет состава продуктов парциального окисления дизельного топлива в кислороде

Углеводородное горючее — дизельное топливо (C_7H_{13}); окислитель — кислород газообразный. Стехиометрическое соотношение компонентов $K_{m0} = 3,375$. Диапазон изменения $\alpha = 0,35...0,45$. Давление в камере сгорания ВТР — 2,5 МПа.

При расчете принято упрощение, связанное с учетом только основных получаемых при парциальном

Таблица П.1.1

Расчетные концентрации продуктов парциального окисления дизельного топлива кислородом при различных соотношениях компонентов

Параметры газа на выходе камеры сгорания ВТР											
α	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,4	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45
T, К	1759	1854	1950	2043	2134	2223	2309	2392	2472	2549	2623
μ , г/моль	15,80	15,98	16,20	16,44	16,68	16,92	17,16	17,40	17,65	17,89	18,13
Концентрации объемные, % об.											
C^{CO}	51,91	51,51	51,01	50,60	50,10	49,59	49,09	48,58	48,08	47,47	46,97
C^{H_2}	47,17	46,46	45,55	44,44	43,43	42,42	41,41	40,40	39,39	38,38	37,37
C^{H_2O}	1,141	2,071	3,070	4,131	5,171	6,201	7,232	8,252	9,252	10,30	11,21
C^{CO_2}	0,485	0,881	1,313	1,798	2,283	2,778	3,283	3,798	4,323	4,858	5,404
δ , %	0,293	0,079	0,061	0,030	0,020	0,010	−0,010	−0,030	−0,040	−0,010	0,050
C^{H_2}/C^{CO}	0,909	0,902	0,893	0,878	0,867	0,855	0,844	0,832	0,819	0,809	0,796
Концентрации массовые, % масс.											
C^{CO}	92,02	90,27	88,21	86,20	84,10	82,07	80,09	78,16	76,29	74,31	72,52
C^{H_2}	5,972	5,815	5,627	5,407	5,208	5,014	4,826	4,643	4,465	4,291	4,122
C^{H_2O}	1,300	2,333	3,414	4,524	5,581	6,598	7,586	8,534	9,438	10,37	11,13
C^{CO_2}	1,350	2,425	3,568	4,812	6,022	7,223	8,417	9,601	10,78	11,95	13,11
δ , %	0,361	0,160	0,177	0,061	0,085	0,094	0,077	0,065	0,025	0,084	0,117
C^{H_2}/C^{CO}	0,065	0,064	0,064	0,063	0,062	0,061	0,060	0,059	0,059	0,058	0,057

Удельный массовый выход продуктов парциального окисления дизельного топлива кислородом при единичном расходе горючего

α	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,4	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45
$m^{\text{ок}}$	1,181	1,215	1,249	1,283	1,316	1,350	1,384	1,418	1,451	1,485	1,519
m	2,181	2,215	2,249	2,283	2,316	2,350	2,384	2,418	2,451	2,485	2,519
m^{CO}	1,997	1,980	1,964	1,948	1,929	1,910	1,890	1,871	1,852	1,828	1,809
m^{H_2}	0,131	0,128	0,125	0,122	0,119	0,117	0,114	0,111	0,108	0,106	0,103
$m^{\text{H}_2\text{O}}$	0,028	0,051	0,076	0,102	0,128	0,154	0,179	0,204	0,229	0,255	0,278
m^{CO_2}	0,029	0,053	0,079	0,109	0,138	0,168	0,199	0,230	0,262	0,294	0,327
$\delta, \%$	-0,18	-0,16	-0,18	-0,06	-0,08	-0,09	-0,08	-0,07	-0,02	-0,08	-0,12

Таблица П.1.3

Удельный массовый выход продуктов парциального окисления дизельного топлива кислородом при единичном расходе окислителя

α	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,4	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45
m^{Γ}	0,847	0,823	0,801	0,780	0,760	0,741	0,723	0,705	0,689	0,673	0,658
m	1,847	1,823	1,801	1,780	1,760	1,741	1,723	1,705	1,689	1,673	1,658
m^{CO}	1,682	1,629	1,573	1,519	1,465	1,414	1,366	1,320	1,276	1,231	1,191
m^{H_2}	0,109	0,105	0,100	0,095	0,091	0,086	0,082	0,078	0,075	0,071	0,068
$m^{\text{H}_2\text{O}}$	0,024	0,042	0,061	0,080	0,097	0,114	0,129	0,144	0,158	0,172	0,183
m^{CO_2}	0,025	0,044	0,064	0,085	0,105	0,124	0,144	0,162	0,180	0,198	0,215
$\delta, \%$	-0,36	-0,16	-0,18	-0,06	-0,08	-0,09	-0,08	-0,06	-0,02	-0,08	-0,12

окислении компонентов: монооксида углерода CO , водорода H_2 , двуоксида углерода CO_2 , воды H_2O .

В таблице П.1.1 обозначены: T — температура в КС (до впрыска воды); μ — мольная масса полученного газа; δ — относительная погрешность расчета концентраций, обусловленная наличием в газе не учитываемых компонент.

В таблицах П.1.2, П.1.3 обозначены: $m^{\text{ок}}$ — массовый расход окислителя при единичном расходе горючего ($m^{\Gamma} = 1$), m^{Γ} — массовый расход горючего при единичном расходе окислителя ($m^{\text{ок}} = 1$); m — суммарный массовый расход углеводородного газа на выходе КС; m^i — массовый выход i -й компоненты смеси на единицу горючего, $i = \text{H}_2, \text{CO}, \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$; δ — относительная погрешность подсчета суммарного массового расхода, обусловленная наличием в газе не учитываемых компонент.

Приложение 2

Описание процедуры идентификации

Для проведения структурной и параметрической идентификации семейства статических характеристик ВТР по данным Приложения 1 составлена таблица приращений П.2.1. При расчете приращений применялась формула восходящих разностей, например, $\Delta T(\alpha_i) = T(\alpha_{i+1}) - T(\alpha_i)$.

Как следует из таблицы П.2.1, приращения массовых расходов компонентов синтез-газа и температуры практически во всех поддиапазонах параметра α изменяются незначительно, что качественно свидетельствует о линейности искомых зависимостей. Дополнительно проводили количественную оценку адекватности линейной модели, которая подтвердила справедливость этой гипотезы для всех анализируемых функций.

Таблица П.2.1

Таблица локальных приращений исследуемых функций

α	0,360	0,370	0,380	0,390	0,400	0,410	0,420	0,430	0,440
$\Delta\alpha$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
ΔT	96	93	91	89	86	83	80	77	74
$\Delta(C^{\text{H}_2}/C^{\text{CO}})$	-0,009	-0,015	-0,011	-0,012	-0,011	-0,012	-0,013	-0,010	-0,013
$\Delta m^{\text{ок}}(m^{\Gamma} = 1)$	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034
Δm^{H_2}	-0,003	-0,003	-0,003	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	-0,002	-0,003
Δm^{CO}	-0,016	-0,016	-0,019	-0,019	-0,020	-0,019	-0,019	-0,024	-0,019
$\Delta m^{\Gamma}(m^{\text{ок}} = 1)$	-0,022	-0,021	-0,020	-0,019	-0,018	-0,018	-0,016	-0,016	-0,015
Δm^{H_2}	-0,005	-0,005	-0,004	-0,005	-0,004	-0,004	-0,003	-0,004	-0,003
Δm^{CO}	-0,056	-0,054	-0,054	-0,051	-0,048	-0,046	-0,044	-0,045	-0,040

Данные для проверки линейности модели $\Delta m^{\text{CO}} = f(\Delta\alpha)$

α_i	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45
$\Delta\alpha_i$	-0,05	-0,04	-0,03	-0,02	-0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
Δm_i^{CO}	0,268	0,215	0,159	0,105	0,051	-0,048	-0,094	-0,130	-0,183	-0,223
$\Delta m_{ip}^{\text{CO}}$	0,237	0,189	0,142	0,095	0,047	-0,047	-0,095	-0,142	-0,180	-0,237
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

В качестве примера проверим адекватность модели $\Delta m^{\text{CO}} = K\Delta\alpha$ для зависимости $\Delta m^{\text{CO}} = f(\Delta\alpha)$ при изменении α за счет варьирования массового расхода дизельного топлива. Выбор примера обусловлен тем, что приращения именно этой переменной визуально изменяются в наибольшей степени. Исходные данные для вычислений получены из таблицы П.1.3 и приведены в таблице П.2.2, где обозначены:

$\Delta\alpha_i = \alpha_i - \bar{\alpha}$, $\bar{\alpha} = 0,40$; $\Delta m_i^{\text{CO}} = m^{\text{CO}}(\alpha_i) - m^{\text{CO}}(\bar{\alpha})$;

m_{ip}^{CO} — значения приращений, рассчитанные по формуле (П.2.1).

Воспользуемся стандартной методикой, изложенной, например, в работе [8]. Прежде всего найдем оценку неизвестного коэффициента K по методу наименьших квадратов:

$$K = \sum_i \Delta m_i^{\text{CO}} \cdot \Delta\alpha_i / \sum_i (\Delta\alpha_i)^2 = -4,73, \quad i = \overline{1, 10}, \quad \text{откуда}$$

$$\Delta m^{\text{CO}} = -4,73\Delta\alpha. \quad (\text{П.2.1})$$

Расчетное значение критерия Фишера для модели (П.2.1) имеет вид [8]

$$F = R_\Phi(n-2)/R_0 = 0,2445 \cdot 8/0,0024 = 815,$$

где $R_0 = \sum_{i=1}^{10} (\Delta m_{ip}^{\text{CO}} - \bar{\Delta m}^{\text{CO}})^2 = 0,2445$ — остаточная сумма квадратов отклонений расчетных значений

$\Delta m_{ip}^{\text{CO}}$ от среднего $\bar{\Delta m}^{\text{CO}} = \sum_{i=1}^{10} \Delta m_i^{\text{CO}} = 0,012$,

где $n = 10$ — число наблюдений; $R_\Phi = \sum_{i=1}^{10} (\Delta m_i^{\text{CO}} - \Delta m_{ip}^{\text{CO}})^2 = 0,0024$ — сумма квадратов отклонений наблюдаемых и расчетных значений.

Поскольку даже при высоком уровне значимости $p = 0,01$ расчетное значение критерия Фишера больше табличного $F \gg F^T$ ($p = 0,01, 1, 8$) = 11,26, то линейная модель (П.2.1) адекватно описывает исходные данные.

Identification of the Static Characteristics of the Synthesis Gas Generators

Yu. V. Zagashvili, y.zagashvili@yandex.ru ✉, **G. B. Savchenko**, **Yu. N. Filimonov**,
LLC "HTR", Saint-Petersburg, 199226, Russian Federation

Corresponding author: **Zagashvili Yury V.**, Ph. D.,
LLC "HTR", Saint-Petersburg, 199226, Russian Federation,
e-mail: y.zagashvili@yandex.ru

Received on April 09, 2015

Accepted April 23, 2015

A method is proposed for identification of the static characteristics of the synthesis gas generators, allowing us to obtain the dependences of the output variables — mass flow components of the synthesis gas (hydrogen and carbon monoxide) — on the input variables — the mass flow of hydrocarbon fuel and oxidizer. The technique is illustrated by calculation of the characteristics of the original high-energy managed core engine of STS type, in which diesel fuel and oxygen are treated as the initial feed components. According to the preliminary thermodynamic calculations of the hydrogen-containing gas at the outlet of the combustion chamber of STS models, the obtained mass flow increments the components of the synthesis gas in the vicinity of the nominal technological mode, allowing calculation of the output characteristics of the STS as an object of regulation. The presentation models were confirmed by the linear dependencies. A relative invariability to the variations in the parameters of the models of a fractionary oxidation mode was proved. The models, which were obtained for example, are applicable for a given pair of the input components, but have sufficient flexibility, as they permit to take into account the scale factor — the core engine efficiency. The proposed method of identification and the obtained models based on it allow a synthesis of the control laws for the fractionary oxidation process and simulation modes of the core engine. In particular, these models can be used for an optimal automatic control of the performance of the core engine, while ensuring the desired ratio of the synthesis gas components, which is especially important when the hydrocarbon fuel is used as the APG with an unstable composition.

Keywords: core engine, combustion chamber, fractionary oxidation, hydrocarbon fuel, oxidant, synthesis gas, hydrogen, thermodynamic calculations, concentrations of components, identification, static characteristics, model increments

For citation:

Zagashvili Yu. V., Savchenko G. B., Filimonov Yu. N. Identification of the Static Characteristics of the Synthesis Gas Generators, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 8, pp. 556–563.

DOI: 10.17587/mau.16.556-563

References

1. Braginskij O. B. *Mirovoj neftegazovyy kompleks* (World oil and gas industry), Moscow, Nauka, 2004, 605 p. (in Russian).
2. Aniskevich Ju. V., Krasnik V. V., Filimonov Ju. N. *Vybor rezhimnyh parametrov processa parcial'nogo gazofaznogo okisleniya metana kislorodom vozduha s cel'ju poluchenija sintez-gaza trebuemogo sostava* (Selection of operating parameters of the gas-phase partial oxidation of methane with oxygen from air to produce the required synthesis gas composition), *Zhurnal Prikladnoj Himii*, 2009, vol. 82, iss. 8, pp. 1335–1341 (in Russian).

3. *Ustrojstvo dlja poluchenija sintez-gaza* (An apparatus for producing synthesis gas), Patent RF № 2523824 (in Russian).
4. *Ustrojstvo generatora sintez-gaza* (The device synthesis gas generator), Patent RF № 2535121 (in Russian).
5. *Sposob poluchenija sintez-gaza* (A method for producing synthesis gas), Patent RF № 2521377 (in Russian).
6. *Reaktor dlja poluchenija nepredel'nyh uglevodorodov, preimushhestvenno jetilena* (The reactor to produce unsaturated hydrocarbons, mainly ethylene), Patent RF № 2369431 (in Russian).
7. Glushko V. P. ed. *Termodinamicheskie i teplofizicheskie svoystva produktov sgoranija* (Thermodynamic and transport properties of combustion products), vol. 1, Moscow, VINITI AN SSSR, 1971, 263 p. (in Russian).
8. L'vovskij E. N. *Statisticheskie metody postroenija jempiricheskikh formul* (Statistical methods for constructing empirical formulas), Moscow, Vysshaja shkola, 1988, 239 p. (in Russian).
9. Savchenko G. B. *Sposob poluchenija vodoroda na osnove kriticheskikh tehnologij* (A method for producing a hydrogen based on critical technologies), *Nasosy. Turbiny. Sistemy*, 2014, no.1, pp. 21–26 (in Russian).

УДК 623.7.011.89

DOI: 10.17587/mau.16.563-569

А. В. Шукалов^{1, 2}, ген. директор, доц., aviation78@mail.ru,

И. О. Жаринов^{1, 2}, д-р техн. наук, доц.,

руководитель учебно-научного центра, зав. кафедрой, igor_rabota@pisem.net,

О. О. Жаринов³, канд. техн. наук, доц., zharinov73@hotmail.ru,

М. О. Костишин², аспирант, job.max@me.com,

В. А. Нечаев^{1, 2}, главный конструктор, доц., postmaster@elavt.spb.ru,

¹ Санкт-Петербургское ОКБ "Электроавтоматика" им. П. А. Ефимова,

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО),

³ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП)

Алгоритм решения проектной задачи выбора оптических параметров бортового средства индикации на основе жидкокристаллической панели

Рассматривается проектная задача выбора оптических параметров бортового средства индикации, выполненного на базе жидкокристаллической панели. Релевантными параметрами проектирования определены: неравномерность яркости, яркость, цветовой контраст, яркостной контраст, коэффициент диффузного отражения, коэффициент зеркального отражения, цветовой охват. Предлагается алгоритм автоматизированного выбора значений параметров, основанный на процедуре лексикографической оценки. Процедура лексикографической оценки предполагает ранжирование проектных параметров по важности и поиск оптимального значения каждого параметра независимо от значений других параметров. Приводятся выражения для вычисления значений оценок параметров и описываются способы поиска наилучшего значения по каждому из параметров. В основе алгоритма используются частные решающие правила, устанавливающие граничные значения анализируемых параметров.

Ключевые слова: авионика, средства индикации, оптические параметры, процедура выбора, проектное решение, алгоритм

Введение

Выбор оптических параметров бортового средства индикации класса МФЦИ (многофункциональный цветной индикатор) [1, 2] является проектной процедурой, подлежащей оптимизации. Оптимизация решения задачи выбора может осуществляться на двух этапах:

- на этапе проектирования пилотажно-навигационного комплекса (ПНК), в состав которого входит МФЦИ;
- на этапе проектирования МФЦИ.

Решение задачи выбора оптических параметров МФЦИ на этапе проектирования ПНК выполняется с использованием критерия оптимальности Парето [3, 4], когда разработчику предъявлено множество моделей МФЦИ, характеристики которых заданы в технической документации. Критерий Парето состоит в отказе от поиска единственного (наилучшего) проектного решения и соглашении о том, что предпочтение одного проектного решения (варианта) перед другим можно отдавать, только если первый вариант оказывается лучше второго

по всем сравниваемым параметрам. Если предпочтения хотя бы по одному параметру расходятся с предпочтениями по другому, то такие варианты оказываются несравнимыми. В результате попарного сравнения вариантов худшие по всем параметрам варианты отбрасываются, а оставшиеся, несравнимые между собой (недоминируемые), принимаются. Выбор МФЦИ разработчиком ПНК в этом случае может быть проведен равновероятно из числа моделей МФЦИ, входящих в множество Парето.

Основным недостатком решающего правила на основе критерия Парето в данном случае является невозможность учета специфических требований к ПНК в требованиях к МФЦИ, в связи с чем разработчик ПНК вынужден осуществлять выбор МФЦИ и оптимизацию ПНК на основе переговорного множества моделей МФЦИ с фиксированными параметрами.

Влияние специфических требований к ПНК на требования к МФЦИ учитывается в модели оптимизации, основанной на принципе превосходства одних параметров проектирования МФЦИ над другими. Основанием для вывода об абсолютном превосходстве параметров одного варианта над параметрами другого варианта служит методика, ис-

пользующая различие параметров по важности, при которой сравнение значений параметров проектных альтернатив осуществляется сначала только по самому важному параметру без учета значения остальных, затем только по второму по важности параметру и т. д.

Информация об абсолютном превосходстве параметров одного варианта над параметрами другого позволяет ранжировать возможные варианты проектных решений с использованием процедуры лексикографической оценки [5]. Реализация процедуры лексикографической оценки предусматривает декомпозицию исходной многомерной задачи оптимизации (например, методом последовательных уступок [3]) в определенную последовательность задач (стратегию) оценки по иерархически упорядоченным скалярным параметрам.

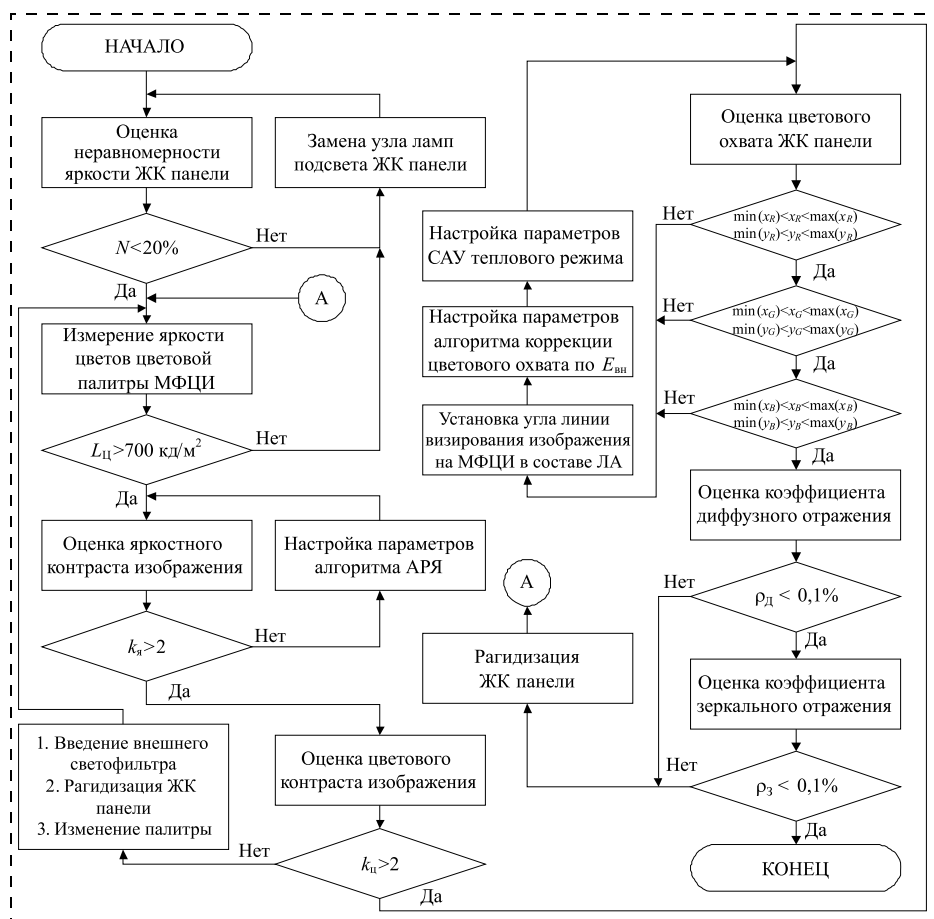
Предполагается, что первый параметр важнее второго, второй — важнее третьего и т. д., т. е. каждый последующий параметр сужает множество проектных решений, получаемых на основе совокупности предыдущих параметров. Это означает, что если в исходной задаче оптимизации с одним параметром имеется несколько проектных решений, и для дальнейшего выбора последовательно применяются дополнительные параметры, то получаемые в

результате стратегии решения будут оптимальными для соответствующей лексикографической задачи с векторным параметром, состоящим из всех поочередно рассматриваемых параметров.

Цель исследования заключается в разработке алгоритма, основанного на процедуре лексикографической оценки, для решения проектной задачи выбора оптических параметров бортового средства индикации на этапе проектирования МФЦИ.

Алгоритм выбора оптических параметров бортового средства индикации

Алгоритм решения проектной задачи выбора оптических параметров бортового средства индикации приведен на рисунке. Релевантными оптическими параметрами МФЦИ, выполненного на базе жидкокристаллической (ЖК) панели, влияющими на визуальные характеристики восприятия наблюдателем изображения, являются:



Алгоритм решения проектной задачи выбора оптических параметров бортового средства индикации, выполненного на базе ЖК панели

- неравномерность яркости изображения по полю ЖК панели;
- яркость цветов и оттенков, заданных в цветовой палитре МФЦИ цифровыми кодами *RGB* (*R* — Red, *G* — Green, *B* — Blue);
- яркостной контраст изображения, индицируемого на ЖК панели МФЦИ;
- цветовой контраст изображения, индицируемого на ЖК панели МФЦИ;
- цветовой охват воспроизводимых на ЖК панели цветов и оттенков;
- коэффициенты диффузного и зеркального отражения.

Неравномерность яркости изображения ЖК панели обусловлена технологическим разбросом яркости свечения источников заднего или бокового подсвета белого спектра свечения (газоразрядные лампы, светодиоды). Визуально неравномерность яркости воспринимается наблюдателем за счет наличия существенной разницы в яркости изображения в различных участках экрана. Опытным путем и испытаниями на подтверждение ресурса изделия установлено, что снижение яркости в центре ЖК панели свойственно экранам с газоразрядными лампами подсвета.

Неравномерность яркости по краям ЖК панели свойственна как экранам с газоразрядными лампами подсвета, так и с подсветом на основе светодиодов. В большинстве случаев неравномерность яркости по краям панели проявляется за счет несовершенства конструктивного исполнения изделия, при котором отдельные части жидкокристаллической матрицы оказываются на разном расстоянии от источника подсвета, в результате чего эти части имеют повышенную (пониженную) яркость изображения.

Неравномерность яркости изображения оценивается по формуле

$$N = \frac{\max L_i - \min L_i}{\min L_i} \cdot 100 \%,$$

где L_i , $i = 1, 2, \dots, M$, — измеренное яркомером значение яркости цвета в i -й точке ЖК панели. Как правило, для оценки неравномерности яркости изображения измерения проводятся в одном цвете — белом, индицируемом на всей площади экрана.

Число точек, в которых измеряется яркость, определяется желаемым уровнем точности представления оценки неравномерности яркости ЖК панели. Достаточно грубая оценка неравномерности яркости ЖК панели с диагональю экрана 10 дюймов может быть получена на основе пяти измерений: в центре экрана и в четырех углах экрана.

Приемлемым для практического использования в авиационной промышленности считается ЖК панель, у которой неравномерность яркости изображения не превышает 10...20 %. Для образцов, обладающих большим значением неравномерности яркости, требуется замена модуля подсвета ЖК панели, так как компенсировать неравномерность

яркости подсвета в изделии не представляется возможным.

Яркостной контраст изображения определяется отношением яркости цвета $L_{ц}$, воспринимаемого наблюдателем, к яркости цвета фона $L_{ф}$. Количественная оценка значения яркостного контраста изображения определяется по формуле [6]

$$K_{я} = \frac{L_{ц} - L_{ф}}{L_{ф}}.$$

Цвет фона в авиационной промышленности черный, реже — серый. Важно заметить, что яркостной контраст — это характеристика восприятия наблюдателем одного определенного цвета, поэтому контраст изображения для белого цвета, воспринимаемого наблюдателем на черном фоне, отличается от контраста синего цвета на том же черном фоне, от контраста для красного, зеленого цвета и т. д.

Приемлемой для практического использования в авиационной промышленности считается ЖК панель, обеспечивающая индикацию изображения во всех цветах со значением яркостного контраста, превышающим 2 (при уровне внешней освещенности экрана до 75 клк), и с уровнем собственной яркости изображения в белом цвете, превышающим 700 кд/м². Методика и результаты экспериментальной оценки контраста изображения с различными отображаемыми цветами для нескольких моделей МФЦИ, в которых установлены ЖК панели различных изготовителей, приведены в работе [6].

Исследование влияние **цветового контраста** на характеристики восприятия наблюдателем изображения в авиационной промышленности получило свое развитие в связи с введением в средства индикации режима отображения совмещенных кадров. Актуальными для практического применения сегодня являются режимы совмещения [7, 8]:

- пилотажно-навигационной и картографической информации;
- пилотажно-навигационной информации и информации от бортовой метеорологической станции;
- пилотажно-навигационной информации и информации от системы раннего предупреждения близости Земли и др.

В отличие от яркостного контраста изображения цветовой контраст характеризует способность наблюдателя воспринимать информацию не на фоне одного фиксированного цвета (черного), а на фоне цвета, который изменяется в процессе полета. В частности, в процессе полета летательного аппарата (ЛА) над зонами болотистой местности, перемежающейся с участками суши, значение счетчика текущей барометрической высоты полета, отображаемого белым цветом, может попеременно индицироваться на фоне зеленого цвета болота или на фоне светло-серого цвета суши в режиме совмещения изображений "навигация и картография". Таким образом, изменение цвета фона изображения связано с динамическим обновлением на экране МФЦИ

цифровой карты местности, соответствующим скорости и направлению движения ЛА. Как в случае индикации параметра в белом цвете на зеленом фоне, так и в случае индикации параметра в белом цвете на светло-сером фоне средство отображения должно обеспечивать устойчивое восприятие наблюдателем значения текущего полетного параметра.

Количественная оценка значения цветового контраста определяется по формуле [6]

$$K_{ц_i} = \frac{L_{ц_i} - L_{ц_j}}{L_{ц_j}},$$

где $L_{ц_i}$ — измеренная яркость цвета, воспринимаемого наблюдателем на фоне цвета с измеренной яркостью $L_{ц_j}$. Приемлемыми для практического использования в авиационном приборостроении считается ЖК панель и цветовая палитра МФЦИ, обеспечивающие индикацию изображения во всех используемых цветах со значением цветового контраста, превышающим 2 (при уровне внешней освещенности экрана до 75 клк). Повышение значения цветового контраста изображения МФЦИ возможно за счет:

- введения внешнего светофильтра, конструктивно располагаемого перед ЖК панелью в направлении наблюдателя;
- выполнения процедуры рагидизации [9—11], т. е. нанесения на поверхность ЖК панели специализированной пленки на клеевой основе, обладающей частотно-избирательными, антибликовыми и антиотражающими свойствами;
- специализированного подбора компонентов RGB цветовой палитры МФЦИ для всех паросочетаний цветов, обладающих максимально возможной цветовой разницей [12]. В ряде случаев может быть применен специализированный технический прием, заключающийся в отображении значения полетного параметра с контуром черного цвета, визуально подчеркивающим границы символа в заданном цвете.

Цветовой охват ЖК панели является важнейшей характеристикой цветовоспроизведения бортового средства индикации. Цветовой охват [13, 14] определяется геометрическим местом точек на цветовом графике XY-цветового пространства, внешний периметр которых аппроксимируется фигурой треугольного вида. Точки, вписанные в треугольник цветового охвата, характеризуются координатами цветности изображения, которые потенциально могут быть воспроизведены на ЖК панели, примененной разработчиками в МФЦИ.

Координаты вершин треугольника цветового охвата (x_R, y_R) , (x_G, y_G) , (x_B, y_B) определяются точками, соответствующими координатам чистых ос-

новных цветов (красный, зеленый, синий), и вычисляются по формулам [12]

$$R: \left\{ x_R = \frac{X_r}{X_r + Y_r + Z_r}, y_R = \frac{Y_r}{X_r + Y_r + Z_r} \right\};$$

$$G: \left\{ x_G = \frac{X_g}{X_g + Y_g + Z_g}, y_G = \frac{Y_g}{X_g + Y_g + Z_g} \right\};$$

$$B: \left\{ x_B = \frac{X_b}{X_b + Y_b + Z_b}, y_B = \frac{Y_b}{X_b + Y_b + Z_b} \right\},$$

где $X_r, X_g, X_b, Y_r, Y_g, Y_b, Z_r, Z_g, Z_b$ — компоненты цвета, определенные Международной комиссией по освещению. Каждая модель ЖК панели МФЦИ обладает своими значениями $X_r, X_g, X_b, Y_r, Y_g, Y_b, Z_r, Z_g, Z_b$.

Множество точек, вписанных в треугольник цветового охвата, формируется путем вычисления (x, y) -координат цветности для каждого оттенка цвета из 2^{24} оттенков цветов, воспроизводимых в восьмибитной цветовой модели RGB [11]:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix};$$

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, y = \frac{Y}{X + Y + Z},$$

где X, Y, Z — координаты цвета в цветовом пространстве XYZ; R, G, B — коды (в десятичной системе счисления) компонентов основных цветов в модели RGB.

Цветовой охват ЖК панели зависит [15]:

- от температуры окружающей среды, в которой эксплуатируется МФЦИ. Опытным путем установлено, что смещение координат цветности при снижении окружающей температуры осуществляется в направлении точки белого цвета ЖК панели. Значение приращения координат цветности примерно соответствует 0,0003 единицы цветности на один градус Цельсия. При увеличении температуры окружающей среды площадь треугольника цветового охвата также растет. Зависимость координат цветности изображения от температуры вызвана влиянием температуры на спектральные характеристики излучения модуля подсвета ЖК панели. Для компенсации температурной зависимости в МФЦИ необходимо вводить специализированную систему автоматического управления (САУ) температурным режимом [16] ЖК панели, включающую нагреватель и средство охлаждения (элемент на основе эффекта Пельтье, электровентилятор и пр.);
- от угла наблюдения изображения, индицируемого на ЖК панели. Смещение координат цветности для альбомно-ориентированной панели осуществляется в направлении точки белого

цвета ЖК панели, т. е. изображение под большими углами наблюдения "осветляется". Значение приращения координат цветности примерно соответствует 0,0001 единицы цветности на один угловой градус отклонения от линии визирования, перпендикулярной к плоскости экрана. Смещение координат цветности обусловлено поляризационными свойствами жидких кристаллов. Учет влияния систематического смещения координат цветности на борту ЛА может быть выполнен за счет конструктивного размещения МФЦИ в составе ЛА под фиксированным углом наблюдения [17], для которого и будет определена цветовая палитра.

Важно заметить, что условия эксплуатации МФЦИ допускают влияние внешней освещенности на цветовосприятие наблюдателем изображения. Внешняя освещенность ЖК панели образуется за счет воздействия на экран естественного дневного солнечного света или света солнца, отраженного от неба и облаков. В ночном режиме полета ЛА внешняя солнечная засветка образуется за счет искусственного освещения кабины ЛА белым, красным или сине-зеленым цветом. В связи с незначительным уровнем яркости МФЦИ в ночном режиме полета ЛА даже малый уровень внешней искусственной освещенности кабины приводит к смещению координат цветности индицируемого изображения.

Компенсация внешней освещенности обеспечивается в МФЦИ:

- специализированной схемой автоматической регулировки яркости (АРЯ);
- программным способом, учитывающим спектральный состав падающего светового потока.

Коэффициент зеркального отражения ρ_3 представляет собой способность ЖК панели зеркально отражать падающее на нее оптическое излучение (внешнюю освещенность). Количественно ρ_3 характеризует отношение зеркально отраженного потока излучения к падающему потоку [16, 17]. В эксплуатации влияние зеркальной составляющей отраженного света может быть сведено к минимуму за счет конструктивного размещения МФЦИ в составе ЛА, исключающего возможность зеркального переотражения света от источника внешней освещенности в направлении наблюдателя.

Экспериментально коэффициент ρ_3 определяется из следующего соотношения:

$$\rho_3 = \frac{L_3 \pi}{E_{\text{вн}}},$$

где L_3 — яркость светового потока, зеркально отраженного от поверхности выключенной ЖК панели, освещенной источником света, создающим в плоскости экрана внешнюю освещенность $E_{\text{вн}}$.

Приемлемой для практического использования в авиационном приборостроении является ЖК панель с $\rho_3 < 0,1 \%$. В частности, при $\rho_3 = 0,1 \%$, $E_{\text{вн}} = 75$ клк составляющая зеркально отраженного

света от поверхности ЖК панели будет иметь яркость $L_3 \approx 24$ кд/м². При собственной яркости МФЦИ на уровне 700 кд/м² влияние дополнительной яркости L_3 не приведет к существенному снижению контрастных характеристик восприятия наблюдателем изображения. Для снижения значения коэффициента зеркального отражения ЖК панель может быть подвергнута процедуре рагидизации.

Коэффициент диффузного отражения ρ_d представляет собой способность ЖК панели диффузно отражать падающее на ее оптическое излучение [17]. Диффузное отражение падающего светового потока обеспечивается во все стороны от экрана, в том числе и в направлении наблюдателя.

Количественно ρ_d характеризует отношение диффузно отраженного потока излучения к падающему потоку. Экспериментально коэффициент ρ_3 определяется из соотношения

$$\rho_d = \frac{L_d \pi}{E_{\text{вн}}},$$

где L_d — яркость светового потока, диффузно отраженного от поверхности выключенной ЖК панели, освещенной источником света, создающим в плоскости экрана внешнюю освещенность $E_{\text{вн}}$. Приемлемой для практического использования в авиационном приборостроении является ЖК панель с $\rho_d < 0,1 \%$. Для снижения значения коэффициента диффузного отражения ЖК панель может быть подвергнута процедуре рагидизации. Методика и результаты экспериментальной оценки коэффициентов диффузного и зеркального отражения для нескольких моделей МФЦИ, в которых установлены ЖК панели различных изготовителей, приведены в работе [17].

Заключение

Решение оптимизационной задачи выбора оптических параметров бортового средства индикации имеет важное практическое значение, так как на этапе проектирования МФЦИ в документацию вводятся проектные решения, определяющие качество и эксплуатационные свойства будущего изделия.

Исходными данными для предлагаемого алгоритма являются семь параметров, ранжированных по значимости. Каждый параметр в процессе проектирования подлежит оценке и исследованию в целях определения своего наилучшего значения. Наличие обратных связей в алгоритме предполагает итерационный путь достижения наилучшего значения для каждого параметра.

Все рассмотренные оптические параметры физически измеримы прямым или косвенным способом [18]. Расчетные значения оценок параметров могут быть подтверждены результатами соответствующих светотехнических испытаний в составе автоматизированного рабочего места. Состав автоматизированного рабочего места подробно рассмотрен в работах [6, 13].

Список литературы

1. Жаринов И. О., Жаринов О. О. Бортовые средства отображения информации на плоских жидкокристаллических панелях: Учеб. пособие // Информационно-управляющие системы. СПб: Изд. ГУАП, 2005, 144 с.
2. Парамонов П. П., Копорский Н. С., Видин Б. В., Жаринов И. О. Многофункциональные индикаторы на плоских жидкокристаллических панелях: наукоемкие аппаратно-программные решения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2004. № 3. С. 238—245.
3. Гайкович А. И. Основы теории проектирования сложных технических систем. СПб: НИЦ "МОРИНТЕХ", 2001. 432 с.
4. Ногин В. Д. Проблема сужения множества Парето: подходы к решению // Искусственный интеллект и принятие решений. 2008. № 1. С. 98—112.
5. Гатчин Ю. А., Жаринов И. О. Основы проектирования вычислительных систем интегрированной модульной авионики. М.: Машиностроение, 2010. 224 с.
6. Костишин М. О., Жаринов И. О., Жаринов О. О. Исследование визуальных характеристик средств отображения пилотажно-навигационных параметров и геоинформационных данных в авионике // Информационно-управляющие системы. 2014. № 4. С. 61—67.
7. Парамонов П. П., Ильченко Ю. А., Жаринов И. О., Тарасов П. Ю. Структурный анализ и синтез графических изображений на экранах современных средств бортовой индикации на плоских жидкокристаллических панелях // Авиакосмическое приборостроение. 2004. № 5. С. 50—57.
8. Парамонов П. П., Ильченко Ю. А., Жаринов И. О. Теория и практика статистического анализа картографических изображений в системах навигации пилотируемых летательных аппаратов // Датчики и системы. 2001. № 8. С. 15—19.
9. Литвак И., Наумов Е. Повышение яркостного контраста электронных видеопреобразователей. Расчет и оценка потенциальных возможностей // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2002. № 2. С. 68—71.
10. Индутьный И. З., Шепелявый П. Е., Михайловская Е. В., Парк Ч. В., Ли Дж. Б., До Я. Р. Градиентные светопоглощающие покрытия $\text{SiO}_x\text{-Me}$ для дисплейных экранов // Журнал технической физики. 2002. Т. 72, Вып. 6. С. 67—72.
11. Абдуев М. Х., Дятлов В. М., Дятлов М. В., Никулин Ю. Г., Селиверстов В. И., Семаш А. А. Рагидизированный жидкокристаллический экран. Патент RU 2388031 C1, № 2008135277/28, МПК G02 F1/13, заявл. 02.09.2008, опубл. 27.04.2010, Бюл. № 12.
12. Парамонов П. П., Коновалов П. В., Жаринов И. О., Кирсанова Ю. А., Уткин С. Б. Реализация структуры данных, используемых при формировании индикационного кадра в бортовых системах картографической информации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2. С. 165—167.
13. Жаринов И. О., Жаринов О. О. Исследование распределения оценки разрешающей способности преобразования Грасмана в системах кодирования цвета, применяемых в авионике // Программная инженерия. 2014. № 8. С. 40—47.
14. Жаринов И. О., Жаринов О. О. Исследование свойства равноконтрастности цветовых пространств, применяемых в авионике // Программная инженерия. 2014. № 11. С. 35—43.
15. Ito H., Ogawa M., Sunaga Sh. Evaluation of an organic light-emitting diode display for precise stimulation // Journal of vision. 2013. V. 13, N. 6. P. 1—21.
16. Жаринов И. О., Жаринов О. О., Парамонов П. П., Костишин М. О., Сударчиков С. А. Принципы построения автоматических систем в канале управления тепловыми и светотехническими характеристиками бортовых средств индикации // Известия вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 12. С. 34—38.
17. Костишин М. О., Жаринов И. О. Исследование оптических параметров бортовых средств индикации геоинформационных данных // Вестник Череповецкого государственного университета. 2014. № 2. С. 5—9.
18. Жаринов И. О., Жаринов О. О. Оценка инструментальной погрешности косвенного измерения координат цвета в цветовой модели данных, применяемой в авионике // Программная инженерия. 2014. № 12. С. 39—46.

Algorithm for Selection of the Optical Parameters of the On-Board Indication Equipment Based on a Liquid Crystal Panel

A. V. Shukalov^{1, 2}, aviation78@mail.ru, I. O. Zharinov^{1, 2}, igor_rabota@pisem.net,
O. O. Zharinov³, zharinov73@hotmail.ru, M. O. Kostishin², job.max@me.com,
V. A. Nechayev^{1, 2}, postmaster@elavt.spb.ru,

¹ St. Petersburg Electroavtomatika Scientific Design Bureau named after P. A. Efimov,
St. Petersburg, 198095, Russian Federation,

² St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics,
(ITMO University), St. Petersburg, 197101, Russian Federation,

³ St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, (GUAP),
St. Petersburg, 190000, Russian Federation

Corresponding author: Zharinov Igor O., D. Sc., Associate Professor, Chef of Department,
St. Petersburg National Research University of Information
Technologies, Mechanics and Optics, St. Petersburg, 197101, Russian Federation,
Head of the Training-Research Center, St. Petersburg Electroavtomatika Scientific Design Bureau
named after P. A. Efimov, St. Petersburg, 198095, Russian Federation,
e-mail: igor_rabota@pisem.net

Received on February 20, 2015

Accepted March 24, 2015

Design of the modern on-board equipment for visualization of the air navigation parameters and geodetails (digital district map) is determined by certain requirements to the quality of the visualized information to be displayed. This kind of quality may be characterized quantitatively in terms of brightness and contrast of each color displayed on the screen. In order to ensure

a stable readability of an image for a pilot, a special procedure should choose chromaticity of the coordinates of the image elements. This article deals with the designing problem of selection of the optical parameters of the on-board indication equipment based on a liquid crystal panel. Solution to the problem is of practical importance, because at the design stage indication in the documentation introduces the design solutions, which determine the quality and operational characteristics of the future product. The following relevant parameters for designing were defined: nonuniformity of brightness, brightness value, color contrast, brightness contrast, diffuse reflection factor, mirrored reflection factor, and gamut. An algorithm for an automated selection of the parameters, based on the lexicographic evaluation procedure was proposed. A lexicographic evaluation procedure involves ranking of the design parameters by their relative importance and a further search for the optimal value of each parameter, regardless of the other parameters. The expressions for calculation of the estimated parameters were proposed, and a way for the searching procedure to find the best value for each of the parameters was described. The algorithm is based on certain quotient decisive rules, which establish the boundary values for the analyzed parameters. Feedback in the algorithm ensures an iterative way to achieve the best value for each parameter. The results of the research were obtained during implementation of the developmental works and can be used by the developers of the on-board indication equipment to perform circuit calculations.

Keywords: avionics, indication equipment, optical parameters, choosing procedure, designing solution, algorithm

For citation:

Shukalov A. V., Zharinov I. O., Zharinov O. O., Kostishin M. O., Nechayev V. A. Algorithm for Selection of the Optical Parameters of the On-Board Indication Equipment Based on a Liquid Crystal Panel, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 8, pp. 563—569.

DOI: 10.17587/mau.16.563-569

References

1. **Zharinov I. O., Zharinov O. O.** Bortovye sredstva otobrazheniya informacii na ploskikh zhidkokristallicheskih paneljah (Onboard Display on Flat Liquid Crystal Panels), *Informacionno-Upravljajushhie Sistemy*, Saint-Petersburg, 2005, 144 p. (in Russian).
2. **Paramonov P. P., Koporskij N. S., Vidin B. V., Zharinov I. O.** Mnogofunkcional'nye indikatory na ploskikh zhidkokristallicheskih paneljah: naukoemkie apparatno-programmnye resheniya (The multi-functional displays on LCD flat panels: high-tech hardware and software solutions), *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tekhnologij, Mehaniki i Optiki*, 2004, no. 3, pp. 238—245 (in Russian).
3. **Gajkovich A. I.** Osnovy teorii proektirovaniya slozhnyh tekhnicheskikh sistem (Fundamentals of the theory of the design of complex technical systems), Saint-Petersburg, MORINTEH, 2001, 432 p. (in Russian).
4. **Nogin V. D.** Problema suzheniya mnozhestva Pareto: podhody k resheniju (The problem of narrowing of the Pareto set: approaches to), *Iskusstvennyj Intellekt i Prinjatie Reshenij*, 2008, no. 1, pp. 98—112 (in Russian).
5. **Gatchin Ju. A., Zharinov I. O.** Osnovy proektirovaniya vychislitel'nyh sistem integrirovannoj modul'noj avioniki (Basics of Designing Computer Systems Integrated Modular Avionics), Moscow, Mashinostroenie, 2010, 224 p. (in Russian).
6. **Kostishin M. O., Zharinov I. O., Zharinov O. O.** Issledovanie vizual'nykh harakteristik sredstv otobrazheniya pilotazhno-navigacionnykh parametrov i geoinformacionnykh dannykh v avionike (The study of the visual characteristics of the display means of navigation parameters and GIS data in avionics), *Informacionno-Upravljajushhie Sistemy*, 2014, no. 4, pp. 61—67 (in Russian).
7. **Paramonov P. P., Il'chenko Ju. A., Zharinov I. O., Tarasov P. Ju.** Strukturnyj analiz i sintez graficheskikh izobrazhenij na jekranah sovremennykh sredstv bortovoj indikacii na ploskikh zhidkokristallicheskih paneljah (Structural analysis and synthesis of graphic images on the screens of modern means of on-Board display on LCD flat panels), *Aviakosmicheskoe Priborostroenie*, 2004, no. 5, pp. 50—57 (in Russian).
8. **Paramonov P. P., Il'chenko Ju. A., Zharinov I. O.** Teorija i praktika statisticheskogo analiza kartograficheskikh izobrazhenij v sistemah navigacii pilotiruemykh letatel'nykh apparatov (Theory and practice of statistical analysis of cartographic images in the navigation systems of manned aircraft), *Datchiki i Sistemy*, 2001, no. 8, pp. 15—19 (in Russian).
9. **Litvak I., Naumov E.** Povyshenie jarkostnogo kontrasta jelektronnykh videopreobrazovatelej. Raschet i ocenka potencial'nykh vozmozhnostej (Increasing luminance contrast electronic videoproably. Calculation and evaluation of potential opportunities), *Jelektronika: Nauka, Tehnologija, Biznes*, 2002, no. 2, pp. 68—71 (in Russian).
10. **Indutnyj I. Z., Shepeljavyj P. E., Mihajlovskaja E. V., Park Ch. V., Li Dzh. B., Do Ja. R.** Gradientnye svetopogloschajushhie pokrytija SiO_x-Me dlja displejnykh jekranov (Gradient light-absorbing coating SiO_x Me for display screens), *Zhurnal Tekhnicheskij Fiziki*, 2002, vol. 72, no. 6, pp. 67—72 (in Russian).
11. **Abduev M. H., Djatlov V. M., Djatlov M. V., Nikulin Ju. G., Seliverstov V. I., Semash A. A.** Ragidizirovannyj zhidkokristallicheskij jekran (Rarediseased LCD screen). Patent RU 2388031 C1, № 2008135277/28, MPK G02 F1/13, zajavl. 02.09.2008, opubl. 27.04.2010, Bjul. no. 12.
12. **Paramonov P. P., Konovalov P. V., Zharinov I. O., Kirsanova Ju. A., Utkin S. B.** Realizacija struktury dannykh, ispol'zuemykh pri formirovanii indikacionnogo kadra v bortovykh sistemah kartograficheskij informacii (Implementation of data structures that are used to generate a display frame in airborne systems map information), *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tekhnologij, Mehaniki i Optiki*, 2013, no. 2, pp. 165—167 (in Russian).
13. **Zharinov I. O., Zharinov O. O.** Issledovanie raspredelenija ocenki razreshajushhej sposobnosti preobrazovaniya Grassmana v sistemah kodirovaniya cveta, primenjaemykh v avionike (Research of properties of an assessment of the resolution of Grassmann's transformation in chromaticity coding systems, applied in avionic equipment), *Programmnaja Inzhenerija*, 2014, no. 8, pp. 40—47 (in Russian).
14. **Zharinov I. O., Zharinov O. O.** Issledovanie svojstva ravnokontrastnosti cvetovykh prostranstv, primenjaemykh v avionike (The research of uniformchromaticity property of color spaces, used in avionics equipment), *Programmnaja Inzhenerija*, 2014, no. 11, pp. 35—43 (in Russian).
15. **Ito H., Ogawa M., Sunaga Sh.** Evaluation of an organic light-emitting diode display for precise stimulation, *Journal of Vision*, 2013, vol. 13, no. 6, pp. 1—21.
16. **Zharinov I. O., Zharinov O. O., Paramonov P. P., Kostishin M. O., Sudarchikov S. A.** Principy postroeniya avtomaticheskikh sistem v kanale upravleniya teplovymi i svetotekhnicheskimi harakteristikami bortovykh sredstv indikacii (The principles of automatic systems in the control channel thermal and lighting performance onboard means of indicating), *Izvestija Vuzov. Priborostroenie*, 2014, vol. 57, no. 12, pp. 34—38 (in Russian).
17. **Kostishin M. O., Zharinov I. O.** Issledovanie opticheskikh parametrov bortovykh sredstv indikacii geoinformacionnykh dannykh (The study of optical parameters on-Board tools display GIS data), *Vestnik Cherepoveckogo Gosudarstvennogo Universiteta*, 2014, no. 2, pp. 5—9 (in Russian).
18. **Zharinov I. O., Zharinov O. O.** Ocenka instrumental'noj pogreshnosti kosvennogo izmerenija koordinat cveta v cvetovoj modeli dannykh, primenjaemov v avionike (The evaluation of hardware-caused inaccuracy of indirect measurements of chromaticity coordinates in color model data used in avionics), *Programmnaja Inzhenerija*, 2014, no. 12, pp. 39—46 (in Russian).

А. В. Щёкин, инженер, С. П. Сульдин, канд. техн. наук, доц., rimstanok@mail.ru,
Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева

Ассоциативность траекторий в САМ-приложении "Модуль ЧПУ. Токарная обработка"

Рассмотрена реализация ассоциативности управляющей программы в новом САМ-приложении "Модуль ЧПУ. Токарная обработка" на платформе КОМПАС-3D. Описан расчет ассоциативной траектории и ее твердотельная верификация, выполняемый не выходя за пределы среды КОМПАС-3D. Показано, что наиболее эффективно ассоциативность проявляет себя для параметризованных деталей. Ассоциативность в сочетании с параметризацией детали обеспечивает возможность повторного использования технологического проекта для разных типоразмеров детали.

Ключевые слова: CAD/CAM-система, КОМПАС-3D, управляющая программа, режущий инструмент, 3D-модель, параметризация, API (Application Program Interface)

Введение

Система КОМПАС-3D (ЗАО "АСКОН") является известной в России и странах СНГ САПР среднего уровня, предназначенной для создания трехмерных ассоциативных моделей деталей, чертежей и сборочных единиц. КОМПАС-3D использует собственное геометрическое ядро и параметрические технологии, разработанные специалистами компании АСКОН. Мощный функционал системы поддерживает все возможности трехмерного моделирования, ставшие стандартом в области машиностроительного проектирования. Открытая архитектура КОМПАС-3D и программный интерфейс API позволяют сторонним разработчикам создавать собственные прикладные решения, расширяющие штатный функционал системы.

"Модуль ЧПУ. Токарная обработка" представляет собой первое САМ-приложение для платформы КОМПАС-3D, предназначенное для автоматизации программирования токарных станков с ЧПУ [1]. Приложение полностью интегрировано в среду системы КОМПАС-3D и использует в качестве исходных данных трехмерную модель детали, созданную непосредственно в окне CAD-системы. С появлением данного приложения жизненный цикл детали от конструирования до разработки программы ЧПУ стал возможен в единой среде проектирования КОМПАС-3D. Приложение является коммерческим продуктом и обладает всеми стандартными возможностями токарных модулей современных САМ-систем: широким набором токарных, сверлильных и резбонарезных стратегий, автоматической генерацией траекторий и управляющей программы, постпроцессированием, реалистичной визуализацией с контролем процесса обработки [2, 3].

Одним из требований к современным САМ-системам является обеспечение ассоциативности автоматически генерируемой траектории обработки с исходной конструкторской моделью. Ассоциативность в САМ-системе подразумевает, что любые изменения, внесенные конструктором в деталь, автоматически приводят к динамическому измене-

нию кода управляющей программы для станка с ЧПУ. Ассоциативность является важным условием обеспечения сквозного жизненного цикла изделия, начиная от конструирования и заканчивая его изготовлением на станке с ЧПУ.

Заметим, что ассоциативность наиболее полно реализуется только в САМ-модулях, которые работают в одной связке с CAD-системами, поскольку в данном случае исключается этап конвертирования 3D-модели через промежуточные форматы. Примерами интегрированных CAD/CAM-решений среднего уровня являются SolidWorks + SolidCAM, Autodesk Inventor + InventorCAM [4]. Эти решения работают непосредственно в окне CAD-системы и сохраняют полную ассоциативность с твердотельной моделью, включая сборки. Все операции механической обработки определяются, вычисляются и верифицируются в среде CAD-системы с сохранением полной ассоциативности с моделью. В презентации [5] приводятся принципы обеспечения полной ассоциативности в интегрированной CAD/CAM-системе NX CAM: конструктивные элементы (features) должны базироваться на геометрии заготовки, все параметры обработки (NC-настройки) должны программироваться в одном файле детали. В работах [6–8] для обеспечения интеграции инженерных приложений введено понятие ассоциативного элемента (associative feature — AF), который определяется как набор семантических отношений между геометрическими элементами (entities), в качестве которых могут выступать разного рода ограничения, зависимости, формулы, шаблоны.

В данной статье рассмотрим реализацию ассоциативности траекторий обработки в новом САМ-приложении "Модуль ЧПУ. Токарная обработка" в связке с CAD-системой КОМПАС-3D. Эта реализация ассоциативности основана на понятии технологической модели. Технологическая модель характеризуется набором геометрических элементов, которые существуют виртуально на промежуточных переходах и могут не присутствовать реально в качестве конструктивных элементов (features) на конструкторской модели.

Модель ассоциативности в приложении "Модуль ЧПУ. Токарная обработка"

Начнем с того, что источником геометрической информации для построения траекторий является конструкторская модель детали, созданная в системе КОМПАС-3D. При этом нужно учитывать, что работа технолога в отличие от процесса конструирования связана с технологической моделью детали, которая в большинстве случаев не совпадает с конструкторской. Например, поверхности, которые имеет деталь на промежуточных стадиях обработки (например, между технологическими переходами), являются "виртуальными", их нет на конструкторской модели, но при этом они необходимы для построения траектории обработки на промежуточных переходах.

Таким образом, первым звеном в цепи ассоциативности "конструкторская модель — программа ЧПУ" (рис. 1) является обеспечение связи между технологической моделью перехода и опорными элементами конструкторской модели. В общем случае опорными элементами конструкторской модели могут быть как объекты топологии детали (вершины, грани, ребра), так и дополнительные построения, сопровождающие деталь в ее трехмерном документе, например, эскиз или вспомогательная геометрия (плоскости, кривые, контрольные точки, оси).

Поскольку токарная двухкоординатная обработка является задачей на плоскости, для описания технологической модели достаточно иметь два плоских контура: исходный контур и рабочий контур. Под исходным контуром мы понимаем контур, который деталь имеет в разрезе перед началом текущего технологического перехода. Для первого перехода исходный контур совпадает с контуром заготовки. Рабочий контур — это контур, который деталь должна иметь после окончания текущего технологического перехода. При вращении этих контуров вокруг токарной оси получаются соответственно исходные поверхности и рабочие поверхности детали.

Следующим звеном ассоциативности является обеспечение связи между исходным контуром текущего перехода и технологической моделью предыдущего перехода. Ведь в качестве "заготовки" для второго и следующих переходов нам необходимо использовать результирующие контуры предыдущих переходов, т. е. "виртуальные поверхности" (рис. 2), которые "висят" в воздухе и отсутствуют физически на конструкторской модели. Результирующий контур получается как результат вычитания из исходного контура рабочего контура. Про-

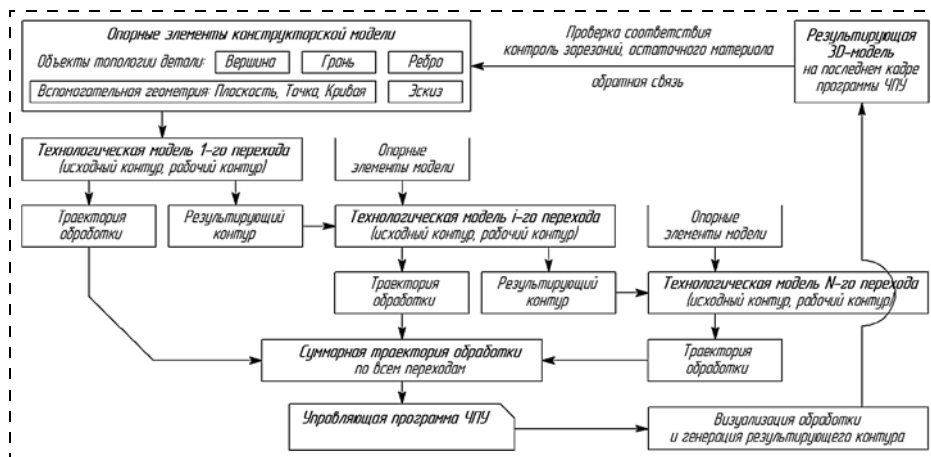


Рис. 1. Схема обеспечения ассоциативности траекторий в САМ-приложении "Модуль ЧПУ. Токарная обработка"

цесс расчета результирующего контура должен повторяться от первого до последнего перехода. Формально это можно выразить следующей цепочкой формул:

$$\begin{aligned} C_1 &= C_0 - C_{p1}, \\ C_2 &= C_1 - C_{p2}, \\ &\dots \\ C_i &= C_{i-1} - C_{pi}, \\ &\dots \\ C_N &= C_{N-1} - C_{pN}, \end{aligned}$$

где C_0 — контур заготовки; C_i — результирующий контур i -го перехода; C_{pi} — рабочий контур i -го перехода.

Наглядно ассоциативность, реализованную в библиотеке, можно представить в виде графа ассоциативных связей, показанного на рис. 3, где $F_1, F_2, \dots, F_i, \dots, F_n$ — опорные элементы конструкторской

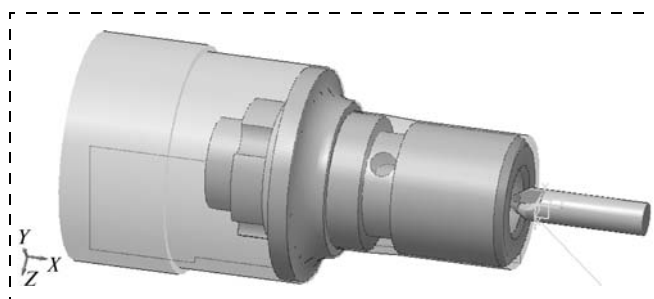


Рис. 2. Технологическая модель на промежуточном переходе

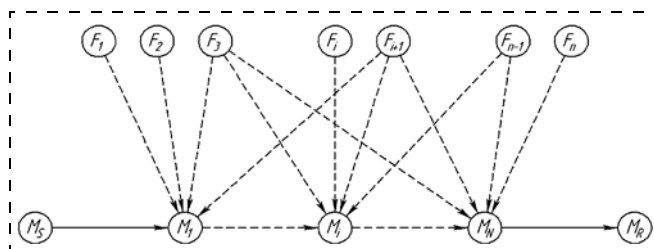


Рис. 3. Граф ассоциативных связей

модели; M_S — модель заготовки; $M_1, \dots, M_i, \dots, M_N$ — технологические модели переходов; M_R — результирующая модель обработки.

Матрица ассоциативности, соответствующая графу, выглядит следующим образом:

	M_1	M_2	...	M_i	...	M_{N-1}	M_N
F_1	1	1	...	0	...	0	0
F_2	1	1	...	0	...	1	0
F_3	1	0	...	1	...	0	1
.....							
F_i	1	0	...	1	...	1	1
.....							
F_N	1	1	...	0	...	0	1

Элементы матрицы показывают наличие или отсутствие ассоциативной связи между технологической моделью перехода и поверхностью детали.

Последовательно суммируя столбцы этой матрицы, можно получить число ассоциативных связей каждой поверхности детали на i -м переходе.

САМ-приложение всю технологическую информацию (номера инструментов, режимы резания, параметры стратегий) вместе с указателями на опорные элементы сохраняет непосредственно в файле конструкторской модели. Для этого используется COM-интерфейс IStorage API системы КОМПАС-3D, который сохраняет указатели сущностей (entity) в 3D-модель и возвращает эти указатели при последующем открытии файла модели. Внутри КОМПАС-3D данный интерфейс использует внутренние имена сущностей. Вместе с указателями на опорные элементы в 3D-модели сохраняется и матрица ассоциативности. При последующем считывании данных из модели с помощью данной матрицы можно восстановить ассоциативные связи между технологическими переходами и опорными элементами.

Программная реализация ассоциативности

Программная реализация САМ-приложения выполнена на языке программирования C++ с использованием программного интерфейса API КОМПАС-3D.

Формирование ассоциативных связей начинается с выбора опорных объектов конструкторской модели, относительно которых задается механическая обработка детали. Визуальный выбор опорных элементов реализован на панели свойств, встроенной в пользовательский интерфейс системы КОМПАС-3D. Предусмотрены два способа формирования рабочего контура: выбором поверхностей непосредственно на модели и указанием эскиза в дереве построения модели.

При первом способе (рис. 4, см. третью сторону обложки) для создания рабочего контура следует

указать мышкой грани модели, относительно которых предполагается обработка. Можно указать следующие поверхности: цилиндр, конус, тор, плоскость. При этом автоматически выполняется проверка пригодности выбранных поверхностей вращения для обработки на токарном станке (ось симметрии поверхностей должна совпадать с токарной осью Z).

При этом способе на панели свойств доступны следующие элементы управления.

Список "Поверхности". При указании мышкой грани детали в этом списке появляется строка, в которой отображаются тип указанной поверхности (цилиндр, тор, плоскость и т. д.), припуск h и смещения $s1$ и $s2$. Контур строится как набор элементов (отрезков и дуг), эквидистантно расположенных по отношению к выбранным поверхностям. С помощью припуска h можно регулировать смещение элемента по нормали относительно поверхности. Значение h может быть только положительным. С помощью величин $s1$ и $s2$ можно сместить крайние точки элемента по линии его продолжения.

С помощью элемента управления **"Общий припуск"** можно установить одно значение припуска для всех поверхностей. Тогда столбец h в списке поверхностей становится недоступным для редактирования.

С помощью кнопки **"Выбирать промежуточные поверхности"** можно выбрать сразу группу поверхностей между двумя последовательно указанными поверхностями.

В создаваемом контуре могут возникать разрывы между эквидистантными элементами. Все эти разрывы отображаются в списке **"Разрывы контура"**. В общем случае может быть четыре способа соединения элементов в разрыве: под прямым углом от оси детали, под прямым углом к оси детали, отрезком, через точку пересечения.

Рабочий контур должен обязательно пересекать исходный контур. Для этого на панели свойств присутствуют элементы управления **"Угол 1"** и **"Угол 2"**, которые определяют способ замыкания рабочего контура на исходный контур. **"Угол 1"** и **"Угол 2"** доступны, если соответствующая крайняя точка рабочего контура лежит внутри исходного контура. Для замыкания контуров в начале и в конце рабочего контура дорабатываются отрезки. При автоматическом способе замыкания отрезки идут по касательной к рабочему контуру в направлении продолжения контура.

Второй способ предполагает использование эскиза в качестве опорного объекта (рис. 5). Эскиз с контуром должен обязательно лежать в токарной плоскости (плоскости ZX).

Эскиз выбирается мышкой в дереве построения модели. При этом способе на панели свойств присутствуют элементы управления, с помощью которых можно изменить направление обхода контура, задать точность аппроксимации сложных кривых. С помощью элементов управления **"Угол 1"** и **"Угол 2"**

можно замкнуть рабочий контур на исходный контур. Элементы контура в эскизе могут быть созданы в произвольной последовательности. Приложение автоматически сортирует их в порядке стыковки при условии, что элементы стыкуются между собой и не пересекаются друг с другом.

Если рассматривать проблему ЧПУ с точки зрения этапов получения готовой управляющей программы, то в архитектуре приложения можно условно выделить три подсистемы: препроцессор, процессор и постпроцессор. Формирование технологической модели можно условно рассматривать как препроцессор, на этапе которого происходит преобразование исходной геометрической информации в ее внутреннее представление, а процессор — это часть программного кода, выполняющая расчет траектории между исходным и рабочим контурами. Траектория рассчитывается отдельно для каждого перехода в соответствии с заданными параметрами стратегии (глубиной резания, направления подачи и прочими настройками). В момент генерации управляющей программы сегменты траектории (отрезки и дуги) переводятся в коды промежуточного языка на основе стандарта ISO, и затем эти коды конвертируются с помощью постпроцессора в кадры управляющей программы на языке конкретной системы ЧПУ [9].

Результирующий контур, который получается вычитанием рабочего контура из исходного контура, не учитывает некоторые особенности, связанные с геометрией режущего инструмента. Например, в процессе реальной обработки детали на станке неизбежно появление скруглений в местах сопряжения поверхностей вследствие наличия у резца радиуса при вершине. Более того, если на технологических переходах используются циклы систем ЧПУ, то траекторию внутри этих циклов может выдать только постпроцессор. Поэтому, чтобы получить 3D-модель обработанной детали, соответствующую реальности, нужно визуализировать обработку специальной командой приложения, которая имитирует движение инструмента и удаление материала с заготовки (рис. 6).

Результирующий контур, который получается в процессе имитации обработки, формируется по алгоритму перемещения заметающей фигуры инструмента по траектории обработки и поэтому учитывает все особенности режущего инструмента.

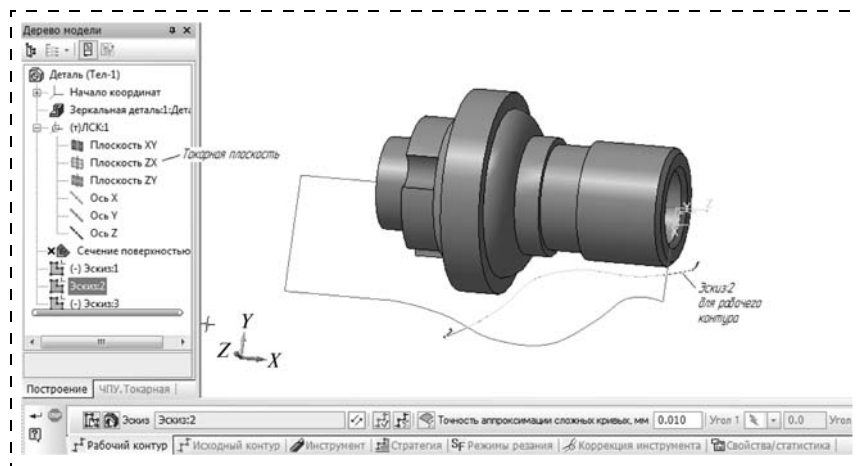


Рис. 5. Выбор эскиза в качестве рабочего контура

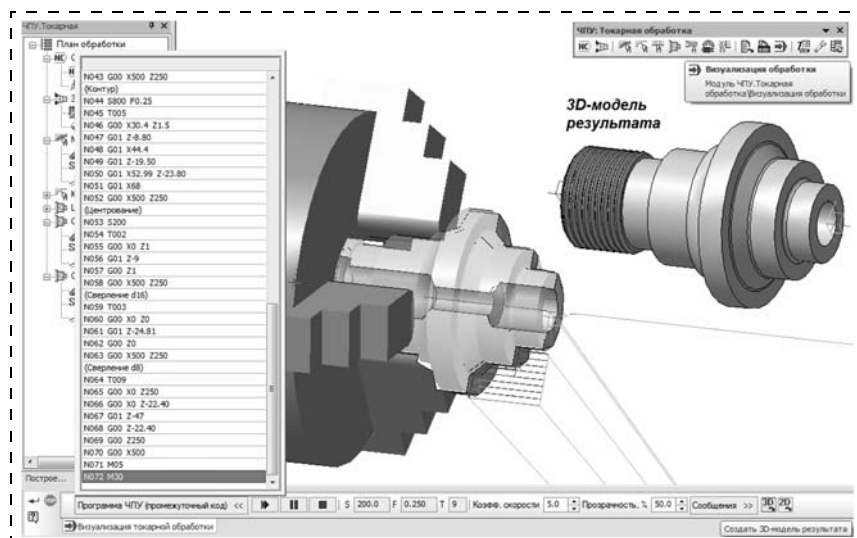


Рис. 6. Получение 3D-модели результата обработки

В дальнейшем модель, построенную на основе этого контура, пользователь может использовать для сравнения с конструкторской моделью для определения зон "зарезаний" или остаточного материала. В этом заключается обратная связь между результатом обработки и конструкторской моделью.

Наиболее эффективно ассоциативность проявляется себя для параметризованных деталей. При изменении значений параметрических переменных модель детали перестраивается, вслед за ней обновляется траектория вместе с управляющей программой (рис. 7).

Отдельным фактором, влияющим на работу ассоциативности, является заготовка. Заготовка может быть получена четырьмя способами:

- относительно граней конструкторской модели;
- по эскизу;
- в качестве отдельной 3D-модели;
- в форме проката.

На рис. 8 показано изменение траекторий для разных форм заготовки (слева — заготовка на ос-

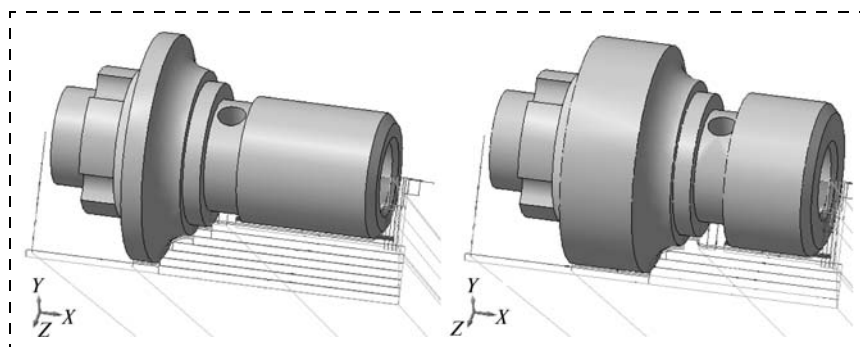


Рис. 7. Перестроение траектории обработки при изменении значений параметрических переменных модели

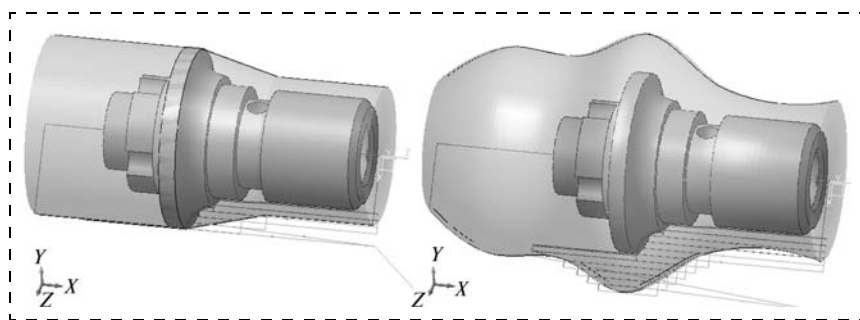


Рис. 8. Перестроение траектории обработки при изменении формы заготовки

нове конструкторской модели, справа — на основе произвольного эскиза).

Первые два способа создания заготовки являются аналогичными построению рабочего контура. В этом случае заготовка получается ассоциативной граням конструкторской модели, а в матрице ассоциативности появляется дополнительный столбец, устанавливающий ассоциативность заготовки с деталью. При остальных способах возникает дополнительное звено ассоциативности, связанное с 3D-моделью заготовки.

При подключении приложения в менеджере библиотек КОМПАС-3D библиотека считывает информацию из файла модели и отображает ее в виде дерева обработок (специальная вкладка, которую библиотека создает в дереве построения модели). При открытии документа или переходе в другой документ библиотека автоматически синхронизирует свои данные с данными, хранящимися в активной модели, обновляет дерево обработок и перестраивает траектории.

Нужно заметить, что ассоциативность работает только в том случае, если не была нарушена топология конструкторской модели (связи между ее вершинами, гранями и ребрами), а были изменены

только количественные параметры этих связей. Если, допустим, мы удалили какую-либо опорную поверхность детали, то ассоциативная связь будет нарушена. В этом случае приложение выдаст сообщение о том, что потеряна связь с опорным объектом.

Заключение

Ассоциативность в САМ-приложении "Модуль ЧПУ. Токарная обработка" является эффективным инструментом обеспечения сквозного жизненного цикла детали, созданной в системе КОМПАС-3D, от этапа конструирования до этапа изготовления детали на токарном станке с ЧПУ. Ассоциативность в сочетании с параметризацией детали обеспечивает возможность повторного использования технологического проекта для разных типоразмеров детали.

Список литературы

1. **Свидетельство** на регистрацию программы для ЭВМ № 2013611436 "Модуль ЧПУ. Токарная обработка". Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9 января 2013 г. Авторы: Щёкин А. В., Сульдин С. П., Митин Э. В.
2. **Паньков М.** Токарная обработка как начало САМ-истории в АСКОН // САПР и графика. 2013. № 7. С. 37—43.
3. **Модуль ЧПУ. Токарная обработка.** URL: <http://machinery.ascon.ru/software/tasks/items/?prcid=89&prpid=1217>
4. **CAD Integration Partners.** URL: <http://www.solidcam.com/en/company/cad-integration-partners>
5. **Create** associative manufacturing models in NX CAM with Part Modules. Bryan Dreibeliss. URL: <https://community.plm.automation.siemens.com/t5/News-NX-Manufacturing/Create-associative-manufacturing-models-in-NX-CAM-with-Part/ba-p/23151>
6. **Ma Y.-S., Tong T.** Associative feature modeling for concurrent engineering integration // Computers in Industry. May 2003. Vol. 51, Iss. 1. P. 51—71.
7. **Ma Y.-S., Britton G. A., Tor S. B., Jin L. Y.** Associative assembly design features: concept, implementation and application // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. March 2007. Vol. 32, Iss. 5—6. P. 434—444.
8. **Ma Y.-S., Chen G., Thimm G.** Paradigm shift: unified and associative feature-based concurrent and collaborative engineering // Journal of Intelligent Manufacturing. December 2008. Vol. 19, Iss. 6. P. 625—641.
9. **Щёкин А. В., Сульдин С. П., Митин Э. В.** Постпроцессор системы ЧПУ "МАЯК 600Т" для САМ-приложения "Модуль ЧПУ. Токарная обработка" // Вестник Мордовского университета. 2014. № 1—2. С. 161—164.

Associativity of the Tool Paths in the CAM-Application "CNC-Module. Lathe Operation"

A. V. Schekin, schekin@inbox.ru, S. P. Suldin, rimstanok@mail.ru ✉,
Mordovia State University named after N. P. Ogaryov, Saransk

Corresponding author: **Suldin Sergey P.**, Chief of Sub-department of Metal-cutting Equipment,
Mordovia State University named after N. P. Ogaryov, Saransk, Russian Federation,
e-mail: rimstanok@mail.ru

Received on April 13, 2015

Accepted April 23, 2015

Associativity tool paths for the original design model in CAM-systems is an important prerequisite for the product life cycle management (PLM) from designing up to manufacturing on CNC machines. The article describes implementation of the associativity of the control program in the new CAM-application "CNC-module. Lathe operation" based on KOMPAS-3D CAD-platform. The application is the first application library developed for CAD-systems KOMPAS-3D and is intended to simulate the processing on CNC lathes. The application is fully integrated into KOMPAS-3D environment and uses a 3D-model created directly in the KOMPAS-3D. Implementation of the principle of associativity is based on the notion of a technological model. The technological model is described by a set of geometric elements, which exist virtually in the intermediate process steps and cannot really be present as features of the design model. CAM-application is implemented in the programming language of C++ using KOMPAS-3D API-interface. The user interface of CAM-application ensures a single-window integration into KOMPAS-3D and uses its interface elements such as toolbars, its own tab in the browser model and the properties panel. The tool paths generation and its solid verification are fully completed inside the KOMPAS-3D environment. It is demonstrated that associativity is most effective for the parametrized components. In combination with parameterization, the associativity provides opportunity to reuse a technology project for different sizes of parts.

Keywords: machine-building, automation, CAD/CAM, KOMPAS-3D, NC-program, cutting tool, 3D-model, parametrization, API, triangulation, visualization, collision detection

For citation:

Schekin A. V., Suldin S. P. Associativity of the Tool Paths in the CAM-Application "CNC-Module. Lathe Operation", *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 8, pp. 570–575.

DOI: 10.17587/mau.16.570-575

References

1. Schekin A. V., Sul'din S. P., Mitin E. V. *Avtorskoe svidetel'stvo 2013611436 Rossiyskaya Federatsiya. Modul' CPU. Tokarnaya obrabotka* (Certificate of authorship 2013611436. Russia. Module CNC. Turning), no. 2013611436, yayavl. 26.11.2012 ; publ. 09.01.2013, Bul. no 1, 368 p. (in Russian).
2. Pankov M. *Tokarnaya obrabotka kak nachalo CAM-istorii v ASKON* (Turning as the beginning of history in the CAM- ASKON), *SAPR i Grafika*, 2013, no. 7, pp. 37–43 (in Russian).
3. Modul' ChPU. Tokarnaya obrabotka (CNC module. Lathe machining). Available at: <http://machinery.ascon.ru/software/tasks/items/?prcid=89&prpid=1217> (in Russian).

4. CAD Integration Partners. Available at: <http://www.solid-cam.com/en/company/cad-integration-partners>

5. Create associative manufacturing models in NX CAM with Part Modules. Bryan Dreibelbiss. Available at: <https://community.plm.automation.siemens.com/t5/News-NX-Manufacturing/Create-associative-manufacturing-models-in-NX-CAM-with-Part/ba-p/23151>

6. Ma Y.-S., Tong T. Associative feature modeling for concurrent engineering integration, *Computers in Industry*, Volume 51, Issue 1, May 2003, P. 51–71.

7. Ma Y.-S., Britton G. A., Tor S. B., Jin L. Y. Associative assembly design features: concept, implementation and application, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, March 2007, vol. 32, iss. 5–6, pp. 434–444.

8. Ma Y.-S., Chen G., Thimm G. Paradigm shift: unified and associative feature-based concurrent and collaborative engineering, *Journal of Intelligent Manufacturing*, December 2008, vol. 19, iss. 6, pp. 625–641.

9. Schekin A. V., Sul'din S. P., Mitin E. V. *Postprocessor sistemy ChPU "MAJaK 600T" dlya CAM-prilozheniya "Modul' ChPU. Tokarnaya obrabotka"* (Post-Processor Of Nc System "MAJaK 600T" For Cam-Application), *Vestnik Mordovskogo Universiteta*, 2014, no. 1, pp. 161–164 (in Russian).

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала: (499) 269-5397, тел./факс: (499) 269-5510

Технический редактор Е. В. Конова. Корректор М. Г. Джавадян.

Сдано в набор 01.06.2015. Подписано в печать 08.07.2015. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН815. 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 "Авансд солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансд солюшнз".

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.



**XI Международная специализированная выставка
Передовые Технологии Автоматизации
ПТА-Урал 2015**



17-19 ноября

Екатеринбург, ЦМТЕ, ул. Куйбышева, д. 44Д

Тематика:

- Автоматизация промышленного предприятия и технологических процессов
- Бортовые и встраиваемые системы
- Системная интеграция и консалтинг
- Автоматизация зданий
- Системы пневмо- и гидроавтоматики
- Измерительные технологии и метрологическое обеспечение
- Электротехника. Электроэнергетика



*Совместно с выставкой
«Электроника-Урал 2015»*

Организатор:
Экспотромгика
www.pta-expo.ru

Москва
Тел.: +7 (495) 234-22-10
E-mail: info@pta-expo.ru

Екатеринбург
Тел.: +7 (343) 376-24-76
E-mail: info@pta-expo.ru