

Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Главный редактор

Шахнов В.А. — д.т.н., проф., член-кор. РАН,
МГТУ им. Н.Э. Баумана

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

- Афанасьев В.Н.** — д.т.н., проф., МИЭМ НИУ ВШЭ
Басараб М.А. — д.ф.-м.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Большаков А.А. — д.т.н., проф., СПбГТИ (ТУ)
Булдакова Т.И. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Ван Мэйлин — д.т.н., проф., Пекинский
политехн. ун-т (КНР)
Зинченко Л.А. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Зубов Н.Е. — д.т.н., проф., РКК «Энергия»
Кларк Р. — д.т.н., проф., КИУ (г. Ворвик,
Великобритания)
Криони Н.К. — д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)
Кузнецов А.Е. — д.т.н., проф., РГРТУ (г. Рязань)
Мальцева С.В. — д.т.н., проф., НИУ ВШЭ
Микаева С.А. — д.т.н., проф., МГУПИ
Неусыпин К.А. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Нефёдов Е.И. — д.ф.-м.н., ИРЭ РАН
Никифоров В.М. — д.т.н., проф., ФГУП «НППАП
им. Н.А. Пилюгина»
Пролетарский А.В. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Проталинский О.М. — д.т.н., проф., НИУ МЭИ
Путилов В.Н. — ООО «Изд-во "Инновационное
машиностроение"» (заместитель
главного редактора)
Румянцева О.Н. — генеральный директор ООО «Изд-во
"Инновационное машиностроение"»
Ся Юаньцин — д.т.н., проф., Пекинский
политехн. ун-т (КНР)
Фу Ли — д.т.н., проф., Ин-т Бейхан (КНР)
Фёдоров И.Б. — д.т.н., проф., академик РАН,
президент МГТУ им. Н.Э. Баумана
Хэ Юн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т
науки и технологии (КНР)
Чистякова Т.Б. — д.т.н., проф., СПбГТИ (ТУ)
Шибанов Г.П. — д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат.
центр им. В.П. Чкалова

Редакторы — **Мымрина И.Н., Селихова Е.А.**
Компьютерная вёрстка — **Конова Е.В.**

Адрес редакции:

107076, Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2.
Тел.: 8 (499) 268-41-77.
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;
http://www.mashin.ru

Учредитель:

ООО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
"ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"»

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре 29 мая 2014 г.
(ПИ № ФС77-58102), входит в перечень утверждённых ВАК
при Минобрнауки России изданий для публикации трудов
соискателей учёных степеней, а также в систему Россий-
ского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Издаётся с 1947 г.

Том 74

11
2020

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

**Глушко А.А., Зинченко Л.А., Макачук В.В., Терехов В.В.,
Михайличенко С.С., Палий Д.Д.** Компьютерное моделиро-
вание стойкости распределённых микросистем к воздей-
ствию тяжёлых заряженных частиц 483

Михайленко Л.А., Устименко В.В., Чубарь А.В. Реализа-
ция нечёткого супервизора для системы высокого порядка
в среде динамического моделирования SIMINTECH 487

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Юйхуэй Ху. Управление траекторией космического аппа-
рата при спуске в атмосфере Марса с модифицированным
ПИД-регулятором 492

**Иванова Г.С., Жильцов А.И., Фетисов М.В., Чулин Н.А.,
Юдин А.Е.** Адаптивная система моделирования 500

Лукьянова Н.В., Полякова А.А. Модульный метод полуна-
турного моделирования системы самонаведения 504

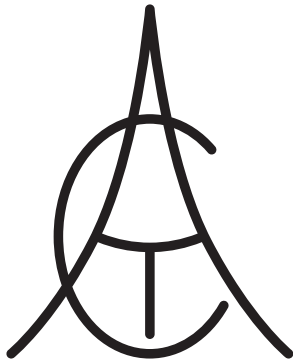
Елисеев В.А. Аспекты организации производственно-техно-
логического развития 509

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

Колодин А.А. Управление на основе прогнозирующей модели
в системах локального регулирования 521

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

По страницам журналов 528



Automation. Modern Technologies

MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Chief in Editor

Shakhnov V.A. – dr.en.s., prof., corr. member of RAS,
MSTU behalf of N.E. Bauman

EDITORIAL COUNCIL:

- Afanasyev V.N.** – dr.en.s., prof., MIEM NRU HSE
Basarab M.A. – dr.ph.-m.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman
Bolshakov A.A. – dr.en.s., prof., SPbSIT (TU)
Buldakova T.I. – dr.en.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman
Wang Meiling – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology,
P.R. China
Zinchenko L.A. – dr.en.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman
Zubov N.E. – dr.en.s., prof., RSC «Energy»
Clark R. – Ph.D., prof., EMB of Warwick Un., UK
Krioni N.K. – dr.en.s., prof., USATU, Ufa
Kuznetsov A.E. – dr.en.s., prof., RSREU, Ryazan
Maltseva S.V. – dr.en.s., prof., NRU HSE
Mikaeva S.A. – dr.en.s., prof., MSUPI
Neusypin K.A. – dr.en.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman
Nefedov E.I. – dr.ph.-m.s., IRE RAS
Nikiforov V.M. – dr.en.s., prof., FSUE «NPCAP
behalf of N.A. Pilyugin»
Proletarskiy A.V. – dr.en.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman
Protalinsky O.M. – dr.en.s., prof., NRU MPEI
Putilov V.N. – LLC «Innovative Mashinostroenie»
Publishers» (deputy chief editor)
Rumyantseva O.N. – General Director of LLC «Innovative
Mashinostroenie» Publishers»
Xia Yuantsin – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology,
P.R. China
Fu Li – Ph.D., prof., Beikhan Un., P.R. China
Fedorov I.B. – dr.en.s., prof., academician RAS, President
of MSTU behalf of N.E. Bauman
He Yung – Ph.D., prof., Nanjing Un. of Science
and Technology, P.R. China
Chistyakova T.B. – dr.en.s., prof., SPbSIT (TU)
Shibanov G.P. – dr.en.s., prof., State Flight Test Center
behalf of V.P. Chkalov

Editors — **Mymrina I.N., Selikhova E.A.**
Computer layout — **Konova E.V.**

Editorial address:

107076, Moscow, Kolodezny lane – 2a, build. 2
Tel.: +7 (499) 268-41-77.
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;
http://www.mashin.ru

Founder:

LLC «INNOVATIVE MASHINOSTROENIE» PUBLISHERS»

The journal was registered in the Roskomnadzor on May 29, 2014
(PI No. FS77-58102), it is included in the list of publications
approved by the Higher Attestation Commission (VAK) of the
Russian Ministry of education and science for publication of the
works of applicants for academic degrees and the system of the
Russian index scientific citation (RINC)

It is published since 1947

Volume 74 $\frac{11}{2020}$

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

**Glushko A.A., Zinchenko L.A., Makarchuk V.V., Terekhov V.V.,
Mikhaylichenko S.S., Paliy D.D.** Computer simulation of the
distributed microsystems resistance to the influence of heavy
charged particles 483

Mikhaylenko L.A., Ustimenko V.V., Chubar A.V. Implementation
of a fuzzy supervisor for a high-order system in a dynamic simula-
tion environment SIMINTECH 487

MODERN TECHNOLOGIES

Yuykhuey Khu. Trajectory control of the spacecraft with modified
PID-regulator during descent in the atmosphere of Mars 492

Ivanova G.S., Zhiltsov A.I., Fetisov M.V., Chulin N.A., Yudin A.E.
Adaptive modeling system 500

Lukyanova N.V., Polyakova A.A. Modular method of semi-natu-
ral homing system modeling 504

Eliseev V.A. The organization aspects of production and techno-
logical development 509

SYSTEMS AND CONTROL DEVICES

Kolodin A.A. Predictive model-based control in local regulation
systems 521

REVIEW OF PERIODICAL PRESS

On the journals pages 528



УДК 681.586

А.А. Глушко, канд. техн. наук, Л.А. Зинченко, д-р техн. наук, проф.,
В.В. Макаручук, канд. техн. наук., доц., В.В. Терехов, С.С. Михайличенко, Д.Д. Палий
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

lzinchenko@bmstu.ru

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОЙКОСТИ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ МИКРОСИСТЕМ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТЯЖЁЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Предложены подходы к моделированию воздействия тяжёлых заряженных частиц на характеристики распределённых микросистем. Представлены результаты компьютерного моделирования их воздействия на двумерные распределённые электростатические микросистемы и проведён сравнительный анализ чувствительности указанных микросистем различной геометрии к их воздействию. На основе анализа сделаны выводы о преимуществах использования элементов фрактальной формы при проектировании микросистем, обладающих повышенной стойкостью к воздействию тяжёлых заряженных частиц.

Ключевые слова: микроэлектромеханические системы; МЭМС; распределённые МЭМС; микросистемы; фрактал; радиация; протоны.

Approaches to modeling the influence of heavy charged particles on the characteristics of distributed microsystems are proposed. The results of computer simulation of their influence on two-dimensional distributed electrostatic microsystems are presented and a comparative analysis of the mentioned microsystems sensitivity with various geometries to their influence is carried out. Conclusions about the advantages of using fractal-shaped elements at the microsystems designing with increased resistance to the influence of heavy charged particles are drawn on the grounds of analysis.

Keywords: microelectromechanical systems; MEMS; distributed MEMS; microsystems; fractal; radiation; protons.

Введение. Создание орбитальных космических систем из взаимодействующих космических аппаратов мини-, микро-, нано-, пико- и фемтоклассов [1] является одним из перспективных направлений развития систем дистанционного зондирования Земли, систем связи и др. Однако существенные ограничения, накладываемые на них по массогабаритным характеристикам, обуславливают возможность эффективного проектирования распределённых космических систем (swarm spacecrafts) только при правильном выборе соответствующей элементной базы: микроэлектронных компонентов и микроэлектромеханических систем (МЭМС). Планируемая область использования проектируемой аппаратуры требует учёта в маршруте проектирования также и воздействия тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ).

Экспериментальные исследования радиационной стойкости разрабатываемой космической аппаратуры являются весьма дорогостоящими, поэтому предпочтительным способом её оценки является компьютерное моделирование. В работе [2] предложены методы моделирования воздействия ТЗЧ на характери-

сти КМОП-транзисторов, в которых для описания физических процессов, протекающих в них под воздействием ТЗЧ, были использованы уравнения Пуассона и непрерывности, а сама методика компьютерного моделирования воздействий ТЗЧ на одиночные микросистемы описана в работе [3]. При этом для моделирования поведения микросистем было использовано программное обеспечение SRIM и Sentaurus TCAD [2–4], а сама утилита SRIM была применена для оценки значения функции энергетических потерь и пространственного распределения энергии на основе предопределённых значений энергии ионов. Причём программа SRIM позволяет определить значения функции энергетических потерь и параметры пространственного распределения генерируемых носителей заряда, имея данные о типе иона и его энергии. Для дальнейших расчётов необходимо было определить численные значения энергетических потерь на ионизацию (электронное торможение) и взаимодействие с кристаллической решёткой (протонное торможение), а также спроецированного радиуса и разброса. Первые две величины измеряются

в мегаэлектронвольтах / миллиграмм на квадратный сантиметр ($\text{МэВ}/\text{мг}\cdot\text{см}^2$), а последняя — в микрометрах ($\mu\text{м}$).

Моделирование полупроводниковых структур было выполнено с помощью САПР Sentaurus TCAD фирмы Synopsys и базировалось на использовании метода конечных элементов. При этом сама система была использована для моделирования тех переходных процессов в микросистемах, которые были вызваны воздействием ТЗЧ [2—4]. В работе [4] приведены результаты двумерного и трёхмерного моделирования воздействия ТЗЧ на три типа электростатических микросистем, имевших различную геометрию. В качестве ТЗЧ для исследования был выбран ион водорода (протон) с энергией 100 МэВ, поскольку именно этот химический элемент наиболее распространён в космическом пространстве, а также имеет наибольшую проникающую способность в структуру микросистем среди других тяжёлых заряженных частиц. Было показано, что максимальное значение тока, вызванное воздействием иона, изменяется в зависимости от угла φ его попадания в объект в диапазоне от 2,0 до 9,2 мкА для стандартного элемента с плоскими обкладками и от 0,22 до 9 мкА для фрактального элемента со ступенчатыми обкладками.

Распределённые микросистемы широко используются в различных приложениях: микроактюаторах, управляющих воздушными потоками [5], микрозеркала для DLP-проекторов [6], распределённых массивах акселерометров, применяемых в тактильных перчатках [7] и др.

В работе [8] опубликован подробный обзор чувствительности микросистем различной физической природы к воздействию радиации, включая ёмкостные (электростатические), электромагнитные, пьезорезистивные и пьезоэлектрические, электротермические и оптические.

Микросистемы, построенные на основе пьезорезистивного эффекта, обладают большей радиационной стойкостью [8, 9], в то время как электростатические МЭМС в наибольшей мере восприимчивы к радиации. Однако воздействие ТЗЧ на распределённые микросистемы в работе [8] рассмотрено не было. В связи с этим актуальными представляются исследования радиационной стойкости распределённых микросистем.

Отметим, что распределённые микросистемы могут быть реализованы как в трёхмерном пространстве, так и на плоскости. В качестве примера рассмотрим воздействие одиночной ТЗЧ на распределённые на плоскости электростатические микросистемы.

Методика моделирования радиационной стойкости распределённых электростатических микросистем.

В качестве объекта исследования были выбраны распределённые микросистемы, реализованные на основе электростатического эффекта, поскольку устройства, использующие этот физический принцип, как уже было сказано, наиболее восприимчивы к воздействию радиации [8]. Для сравнительного анализа радиационной стойкости распределённых электростатических микросистем были выбраны элементы, конструкция которых показана на рис. 1 и 2. На рис. 1 приведён пример стандартной конструкции микроэлемента с плоскими обкладками, а на рис. 2 — пример фрактально-

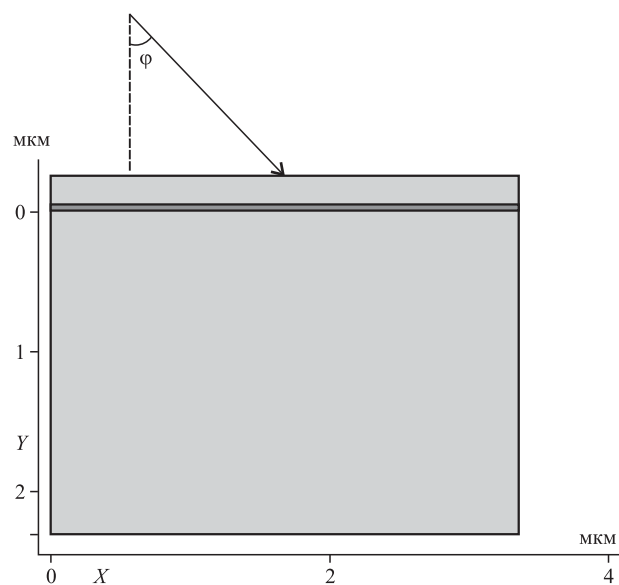


Рис. 1. Модель стандартного решения с плоскими обкладками

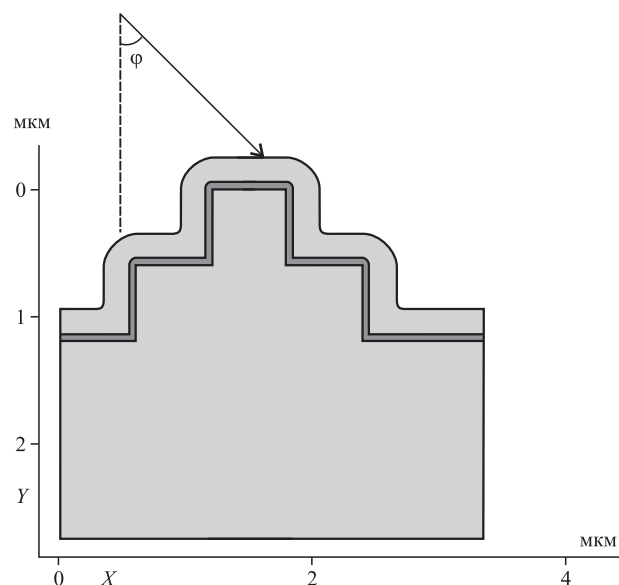


Рис. 2. Модель фрактального решения со ступенчатыми обкладками

го решения со ступенчатыми обкладками. Отметим, что геометрия микросистемы (см. рис. 2) основана на фрактале множества Кантора.

Обкладки всех исследуемых микросистем были выполнены из кремния, а в качестве диэлектрика был использован диоксид кремния. И кремний, и диоксид кремния, как и в моделях [4], были легированы ионами бора с концентрацией $\sim 10^{-13} \text{ см}^{-3}$. Разность напряжения между обкладками всех микросистем составляла 1,5 В. Координаты элементов на плоскости задавались случайным образом. Воздействующие на системы ТЗЧ были ионами неона, падающими под различными углами φ в диапазоне от 0 до 85° относительно оси Y (см. рис. 1, 2). При моделировании предполагалось, что траектории пролетающих ТЗЧ пересекают все три области элемента (две обкладки и диэлектрик), отклоняясь от вертикали под различными углами φ . Результаты изменений характеристик микросистем под воздействием ТЗЧ фиксировались, после чего по полученным данным рассчитывались соответствующее математическое ожидание μ и стандартное отклонение σ характеристик микросистем.

Для снижения вычислительных затрат моделирование было выполнено для случая воздействия ионов неона с энергией 10 МэВ на

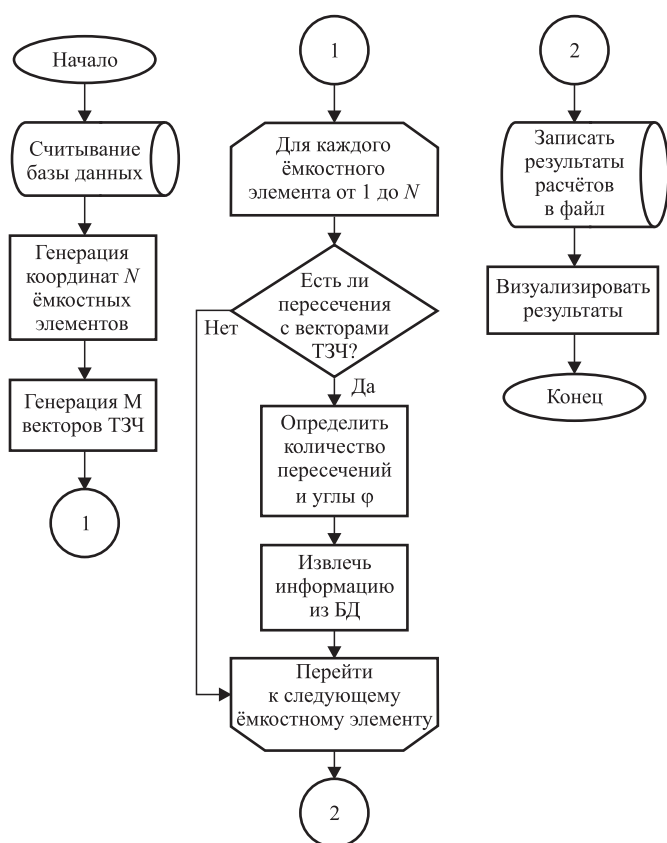


Рис. 3. Схема разработанного алгоритма

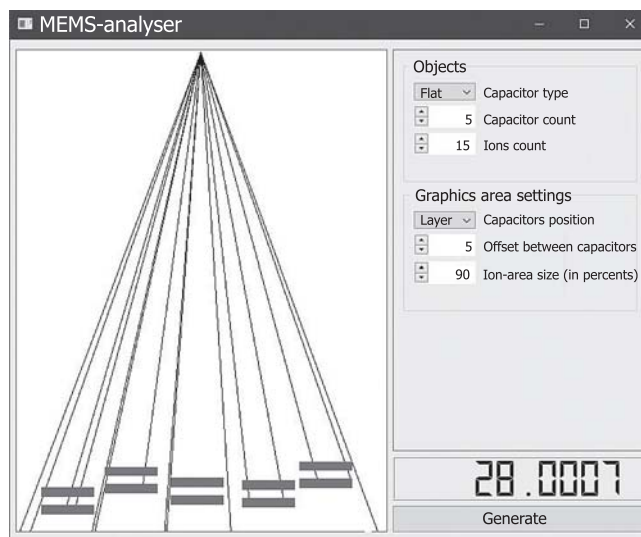


Рис. 4. Главное окно разработанной программы

одиночные элементы различных типов для значений угла падения φ от 0 до 89° с шагом 1° . Все необходимые для моделирования характеристики иона были опубликованы в работе [4]. Полученные численные результаты моделирования записывались в базу данных в формате .csv.

Алгоритм расчёта максимального значения тока для двумерных распределённых электростатических микросистем, состоящих из N элементов (рис. 3), был реализован в программе MEMS Analyzer (рис. 4, главное окно), которая была написана на языке C++ с использованием фреймворка Qt и библиотеки OpenGL, применяемой для визуализации результатов. Программа MatLab использовалась для дальнейшей обработки данных, получаемых из программы MEMS Analyzer.

Результаты моделирования. При выполнении численного эксперимента был использован метод Монте-Карло, в рамках реализации которого было выполнено 10 тыс. итераций приведённого алгоритма. В каждой из итераций угол падения ТЗЧ φ был сгенерирован случайным образом для получения дискретного равномерного распределения, а полученные его значения были сопоставлены с соответствующими величинами максимального изменения тока, взятыми из базы данных. После этого значения тока были записаны в текстовый файл в совместимом с MatLab формате. Далее в САПР MatLab были построены гистограммы распределения числа ТЗЧ, вызвавших определённые изменения максимального значения тока (I_{\max}) (рис. 5 и 6). Из рисунков видно, что число случаев максимального изме-

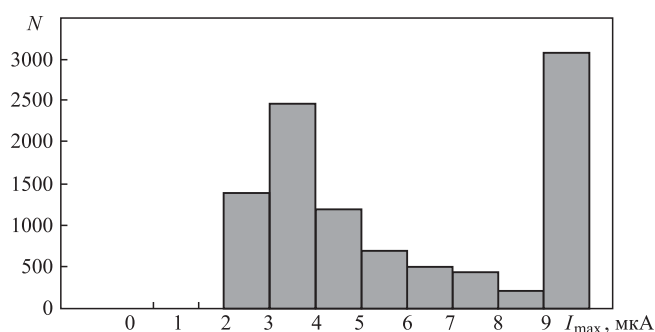


Рис. 5. Гистограмма распределения тока для распределённых двумерных микросистем, состоящих из ёмкостных элементов с плоскими обкладками

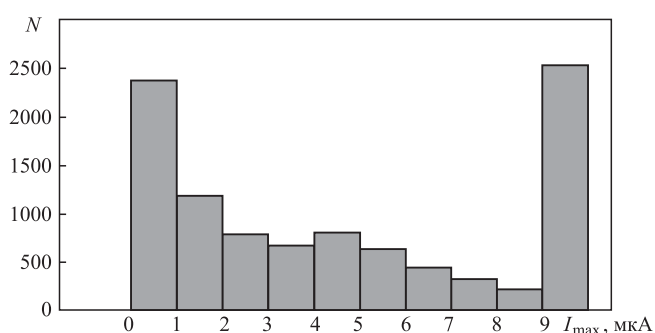


Рис. 6. Гистограмма распределения тока для распределённых двумерных микросистем, состоящих из ёмкостных элементов со ступенчатыми обкладками

нения тока выше для двумерной распределённой микросистемы, состоящей из стандартных элементов с плоскими обкладками.

В таблице приведены значения математического ожидания и дисперсии для двух исследуемых вариантов реализации двумерных распределённых микросистем, рассчитанные для дискретного равномерного распределения. Из таблицы видно, что значения тока для двумерных распределённых микросистем, состоящих из ёмкостных элементов ступенчатого типа, имеют меньшее математическое ожидание и стандартное отклонение.

Сравнение характеристик распределённых микросистем

Параметр	Распределённые микросистемы	
	плоские	ступенчатые
Математическое ожидание пикового значения тока, мкА	5,52	4,18
Среднеквадратичное отклонение пикового значения тока, мкА	4,18	3,54

Заключение. Распределённые микросистемы используются в различных приложениях, одним из которых является их использование в аппаратуре космических аппаратов. Воздействие ТЗЧ может привести к заметным изменениям показаний их датчиков. Полученные результаты компьютерного моделирования и сравнительного анализа двумерных распределённых микросистем, состоящих из ёмкостных элементов с различной геометрией, позволяют сделать вывод, что двумерные распределённые микросистемы, состоящие из ёмкостных элементов ступенчатой формы, обладают большей радиационной стойкостью. Таким образом, использование микросистем с фрактальной геометрией является перспективным для использования в космической аппаратуре.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке (грант РФФИ 18-29-18043).

Библиографические ссылки

- Hadaegh F.Y., Chung S., Manohara H.M. On Development of 100-Gram-Class Spacecraft for Swarm Applications // IEEE Systems Journal. 2016. Vol. 10. No. 2. P. 673—684.
- Глушко А.А., Зинченко Л.А., Шахнов В.А. Моделирование воздействия тяжёлых заряженных частиц на характеристики полевых транзисторов структуры «кремний на изоляторе» // Радиотехника и электроника. 2015. № 7.
- Глушко А.А. Приборно-технологическое моделирование в системе TCAD Sentaurus. М.: МГТУ, 2015.
- Shakhnov V., Glushko A., Makarchuk V., Zinchenko L., Terekhov V., Mikhaylichenko S. Simulation of heavy charged particles damage on MEMS // Proc. of SPIE 10224. 2016.
- Chapius Y., Zhou L., Fukuta Y., Fujita H. FPGA-Based Decentralized Control of Arrayed MEMS for Microbotic Application // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2007. Vol. 54(4). P. 1926—1936.
- Robert Y.S., Jonathan M.P., Hopkin B. A review of micromirror arrays // Precision Engineering. 2018. Vol. 51. P. 729—761.
- Kim H.C., Song S., Kim J. Fabrication of a Miniaturized ZnO Nanowire Accelerometer and Its Performance Tests // Sensors. 2016. Vol. 16(9). P. 1499.
- Shea H.R. Effects of Radiation on MEMS // Proc. of SPIE 7928. 2011.
- Shakhnov V.V., Zinchenko L.A., Kosolapov I.A., Filippov I. Modeling and Optimization of Radiation Tolerant Microsystems / EMS '14 Proceedings of the 2014 European Modelling Symposium. 2014. P. 484—489.

Ссылка для цитирования

Глушко А.А., Зинченко Л.А., Макаrchuk В.В., Тerekhov В.В., Михайличенко С.С., Палий Д.Д. Компьютерное моделирование стойкости распределённых микросистем к воздействию тяжёлых заряженных частиц // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 11. С. 483—486.

УДК 681.5.033.2

Л.А. Михайленко, В.В. Устименко, А.В. Чубарь, канд. техн. наук
(Сибирский федеральный университет, г. Красноярск)

zeyal998@mail.ru

РЕАЛИЗАЦИЯ НЕЧЁТКОГО СУПЕРВИЗОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА В СРЕДЕ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ SIMINTECH

Приведено описание этапов реализации нечёткого супервизора в российской среде моделирования SimInTech. Эффективность применения регулятора рассмотрена на примере динамической системы с обратной связью пятого порядка.

Ключевые слова: ПИД-регулятор; нечёткая логика; SimInTech.

The description of the fuzzy supervisor implementation stages in the Russian simulation environment SimInTech is given. The efficiency of the controller application is considered on the example of a dynamical system with fifth-order feedback.

Keywords: PID controller; fuzzy logic; SimInTech.

Синтез моделей систем управления выше второго порядка в действующих системах автоматизации является актуальной научной задачей. Ввиду стремительного роста сложности объектов автоматизации, увеличения их порядка и быстротечности процессов возникают проблемы с точностью работы системы. Применение пропорционально-интегрально-дифференцирующих (ПИД) регуляторов уменьшает энергетические потери на настройку системы и обеспечивает стремительный выход её параметров на требуемый уровень [1].

Распространение ПИД-регуляторов обусловлено прежде всего их высокими функциональными возможностями, простотой, надёжностью, пригодностью для решения большинства практических задач и низкой стоимостью. В системах с ПИД-регулятором отсутствует статическая ошибка, они обладают высоким быстродействием, обеспечивают относительно высокое качество регулирования объектов, особенно в тех случаях, когда нагрузка в объектах регулирования изменяется часто и быстро.

Естественным направлением развития ПИД-регуляторов является разработка методов, позволяющих снизить затраты человеческого труда на их установку, настройку и обслуживание: для чёткой работы регулятора необходимо корректно настроить его коэффициенты — от правильности их настройки будет зависеть точность и быстродействие системы в целом, что определяет актуальность представленной в статье работы.

В данной работе решается задача реализации нечёткого супервизора — двухуровневой системы, в которой на нижнем уровне располагается обычный ПИД-регулятор, а на верхнем — регулятор на базе нечёткой логики (РНЛ). Назначение РНЛ заключается в том, чтобы автоматически изменять коэффициенты ПИД-регулятора на разных стадиях переходного процесса [2].

Ядром любого регулятора с нечёткой логикой является блок с нечёткой логикой (БНЛ), который включает в себя три основных блока: фаззификации, формирования логического решения и дефаззификации.

Формирование управляющих воздействий включает в себя следующие этапы:

1) получение отклонений управляемых координат: для обеспечения стабилизации выходного сигнала принято использовать две входные переменные — ошибку e и скорость изменения ошибки $e(t)/dt$. Однако иногда помимо этих двух переменных на вход нечёткого регулятора добавляют ещё одну — дифференциал ошибки;

2) фаззификация этих данных: преобразование полученных значений из пространства физических переменных к нечёткому виду в форме лингвистических переменных (ЛП) — переменных, заданных на некоторой базовой шкале и принимающих значения, являющиеся словами естественного языка, которые описываются нечёткими множествами [2];

3) определение нечётких значений выходных переменных в виде функций их принад-

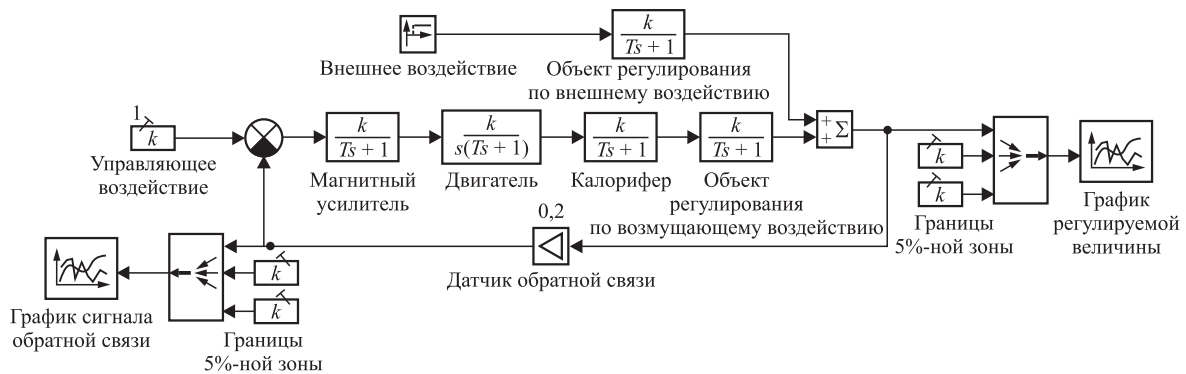


Рис. 1. Система автоматического регулирования, введённая в схемное окно SimInTech

лежности соответствующим нечётким подмножествам. Значение выходной переменной определяется на основе заранее сформулированных правил логического вывода, записанных в базе правил;

4) дефазсификация выходных переменных: обратное преобразование нечётких величин к физическим переменным, используемым для управления объектом, производящееся методами центра тяжести, центра области, среднего максимума и др.

Нечёткий супервизор реализован для динамической системы с обратной связью пятого порядка на примере системы автоматического регулирования (САР) температуры в помещении (рис. 1).

Передаточная функция замкнутой цепи по задающему воздействию имеет вид

$$\Phi_g^y = 2/(16000p^5 + 232840p^4 + 412182p^3 + 21029p^2 + 50p + 2).$$

В качестве среды разработки была выбрана российская среда динамического моделирования технических систем SimInTech, объектом моделирования в которой может выступать любая система, устройство или физический процесс, математическая модель динамики которого описывается системой дифференциально-алгебраических уравнений и может быть реализована методами структурного моделирования [3]. Данная система моделирования была выбрана в качестве среды разработки текущего проекта в связи с тем, что обладает рядом преимуществ, а также необходимыми элементами и модулями для выполнения задания проекта. Прежде всего, это общетехнические библиотеки схемы автоматики, применяющиеся для разработки алгоритмов управления SimInTech, а также

возможность создания пакета проектов, позволяющая реализовать одновременную работу нескольких схем сразу.

Для поддержки связи между различными проектами или объектами внутри единого проекта используется база данных сигналов. Объектно-ориентированная база данных сигналов представляется собой файловую базу данных (БД), в которой содержатся все необходимые сигналы — переменные проекта, применение которых обязательно в тех или иных алгоритмах работы системы.

Проведём анализ исходной системы без применения ПИД-регулятора. Качество работы системы определим по переходной характеристике замкнутой системы (рис. 2).

Из графика переходного процесса можно сделать вывод, что система обладает плохим качеством регулирования: длительное время переходного процесса (более 11 000 с), большое число колебаний, высокий процент перерегулирования (более 90 %). На основании полученных показателей сформулируем требования к системе: САР должна обеспечивать отработку заданного значения без ошибки в установившемся режиме. Время переходного процесса при отработке задания не должно превышать 500 с, число колебаний — не более

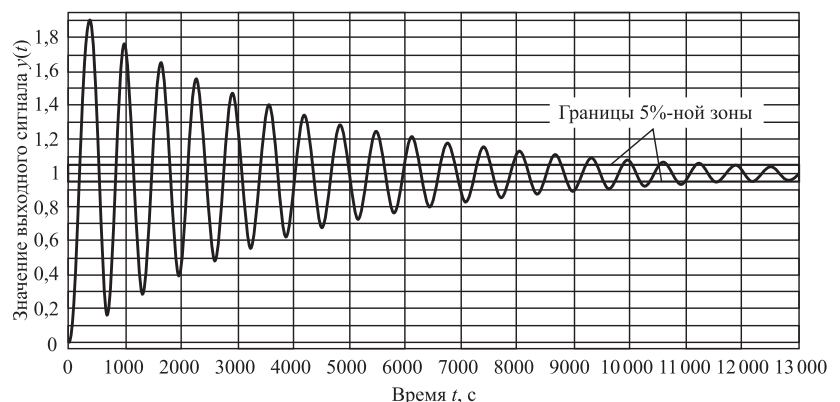


Рис. 2. График переходного процесса замкнутой системы исходной схемы

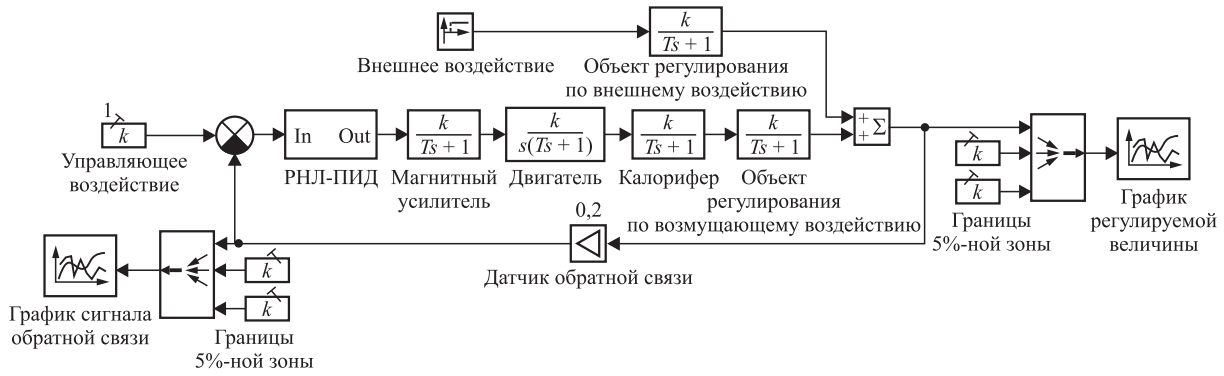


Рис. 3. Система с нечётким супервизором, введённая в схемное окно SimInTech

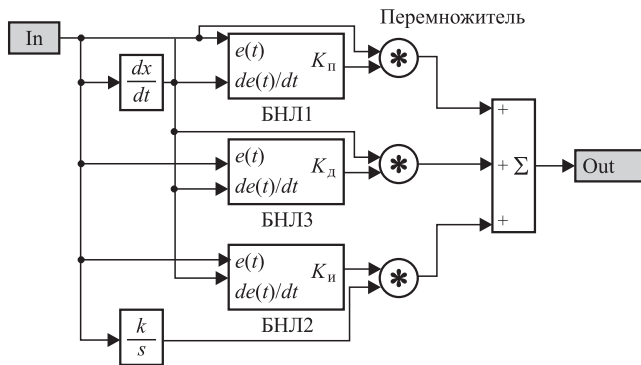


Рис. 4. Состав нечёткого супервизора

одного, а значение его амплитуды не должно превышать 5 % от заданного.

Для улучшения качества регулирования в систему внедрен нечёткий супервизор (рис. 3), который занимает в структурной схеме место обычного управляющего устройства после сравнивающего устройства и отличается от него лишь более громоздким построением.

Состав ПИД на базе нечёткой логики (РНЛ-ПИД), реализованный средствами среды разработки SimInTech, представлен на рис. 4. Нечёткий супервизор включает в себя блоки нечёткой логики для каждого из трёх коэффициентов ПИД-регулятора (БНЛ1 — для про-

порционального, БНЛ3 — для интегрального, БНЛ2 — для дифференциального), реализующие процессы фаззификации, формирования логического решения и дефаззификации.

Различия между блоками нечёткой логики заключаются в реализации базы правил. Для синтеза базы правил были определены и нормализованы лингвистические переменные входных и выходных переменных.

Лингвистические значения нормализованных коэффициентов РНЛ-ПИД (выходных переменных) можно описать с помощью семи термов с наименованиями: Н — нулевой; М1 — малый 1; М2 — малый 2; С1 — средний 1; С2 — средний 2; Б1 — большой 1; Б2 — большой 2.

Каждый из коэффициентов изменяется в различных диапазонах. Приблизительные значения коэффициентов рассчитаны по методу Циглера—Никольса [4] (рис. 5). В этом методе процедуру настройки можно свести к следующим этапам:

1) экспериментальное исследование системы: в исследуемую систему с заданным объектом регулирования добавляют пропорциональный регулятор, коэффициент передачи K_p которого варьируют до тех пор, пока на выходе системы не установятся колебания с постоянной амплитудой;

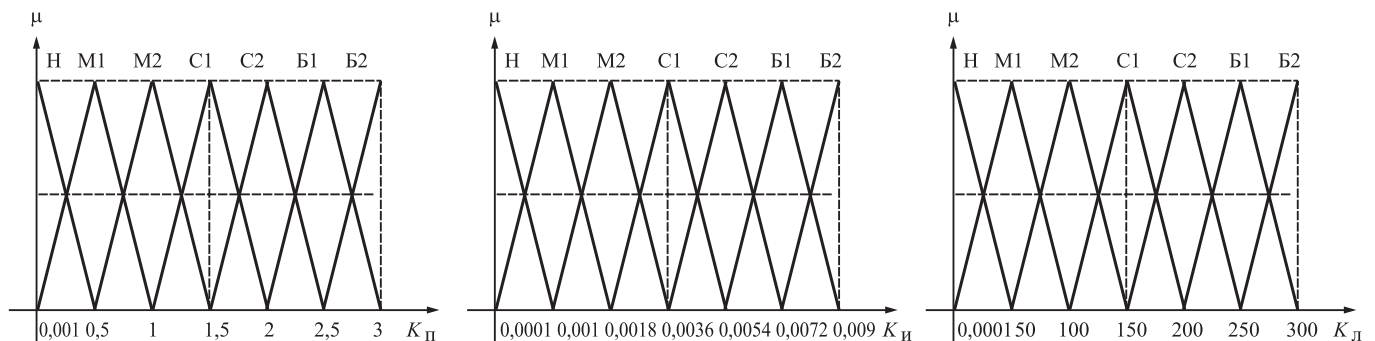


Рис. 5. Лингвистическое описание коэффициентов ПИД-регулятора:

μ — функция принадлежности

База правил регулятора

Номер правила	$e(t)$	$de(t)/dt$	K_p	K_i	K_d	Номер правила	$e(t)$	$de(t)/dt$	K_p	K_i	K_d
1	ОБ	ОБ	Б2	Н	С1	14	Н	ПМ	М1	Б2	М2
2	ОБ	ОМ	Б2	М1	С1	15	Н	ПБ	М1	Б2	М2
3	ОБ	Н	Б2	С1	С1	16	ПМ	ОБ	Б1	Б2	М1
4	ОБ	ПМ	Б2	С2	С1	17	ПМ	ОМ	Б1	Б2	М1
5	ОБ	ПБ	Б2	Б2	С1	18	ПМ	Н	Б1	Б2	М1
6	ОМ	ОБ	Б1	М1	М1	19	ПМ	ПМ	С2	Б2	М1
7	ОМ	ОМ	Б1	Б1	М1	20	ПМ	ПБ	Б2	Б2	М1
8	ОМ	Н	Б1	С2	М1	21	ПБ	ОБ	Б2	Б2	С1
9	ОМ	ПМ	С2	Б2	М1	22	ПБ	ОМ	Б2	Б2	С1
10	ОМ	ПБ	Б2	Б2	М1	23	ПБ	Н	Б2	Б2	С1
11	Н	ОБ	Н	Б2	М2	24	ПБ	ПМ	Б2	Б2	С1
12	Н	ОМ	Н	Б2	М2	25	ПБ	ПБ	Б2	Б2	С1
13	Н	Н	М2	Б2	Н	—	—	—	—	—	—

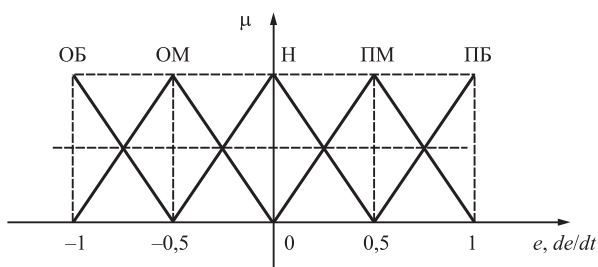


Рис. 6. Лингвистическое описание входных переменных нечёткого супервизора

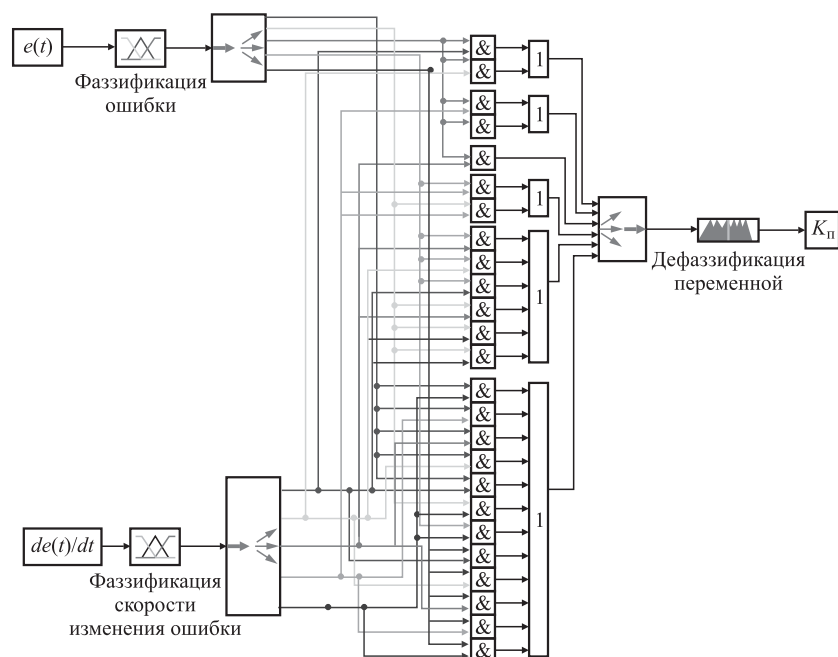


Рис. 7. Структура БНЛ1 — настройки пропорционального параметра K_p

2) фиксирование значений: фиксируются значение коэффициента передачи регулятора K_p^* , при котором система находится на границе устойчивости, и период T^* установившихся в системе колебаний;

3) рассчитываются значения параметров ПИД-регулятора по формулам $K_p = 0,6 K_p^*$; $K_i = 1,2 K_p^*/T^*$; $K_d = 0,6 K_p^*/T^*$.

Проведя рассмотренную процедуру, получим следующие диапазоны изменения параметров ПИД-регулятора: $K_p [0,0001; 3]$; $K_i [0,0001; 0,003]$; $K_d [0,0001; 300]$.

Базовые шкалы ЛП «ошибка управления» и ЛП «производная ошибки управления» нормализованы и имеют по пять термов (рис. 6): ОБ — отрицательная большая; ОМ — отрицательная малая; Н — нулевая; ПМ — положительная малая; ПБ — положительная большая.

Синтезируем базу правил для желаемого поведения выходного сигнала. Она приведена в таблице.

Структуры блоков нечёткой логики для каждого из трёх коэффициентов ПИД-регулятора представлены на рис. 7...9.

Из рис. 10 можно сделать вывод об эффективности применения нечёткого супервизора. Система

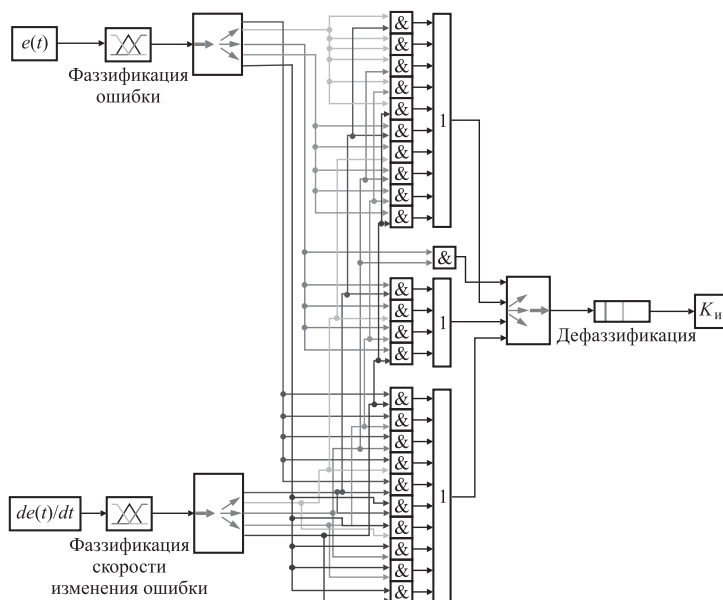


Рис. 8. Структура БНЛ3 — настройки интегрального параметра K_i

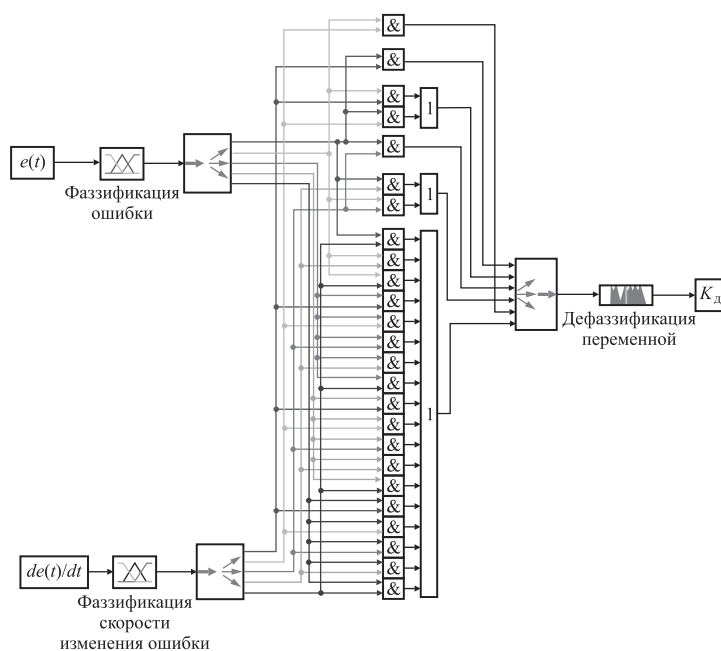


Рис. 9. Структура БНЛ2 — настройки дифференцирующего параметра K_d

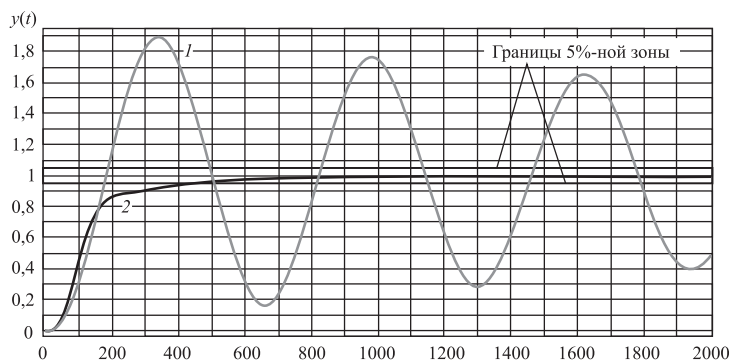


Рис. 10. Графики переходного процесса САР:

1 — исходная схема; 2 — система с нечётким супервизором

с регулятором, спроектированным по заданной базе правил, полностью удовлетворяет предъявляемым к ней требованиям: система плавно переходит к заданным параметрам, колебания отсутствуют, время регулирования сократилось до 416 с.

Однако процесс реализации нечёткого супервизора можно назвать громоздким ввиду реализации базы правил регулятора. При упрощённом применении регулятора на базе нечёткой логики, база правил может быть значительно сокращена: до 5—9 правил.

Тем не менее применение нечёткого супервизора имеет ряд преимуществ, главными из которых являются гибкость и адаптивность регулятора под систему и внешние воздействия, что повышает пригодность применения нечёткой логики, несмотря на сложность формулирования правил логического вывода и синтеза базы правил.

Библиографические ссылки

1. Гусаров А.В., Кошляков П.С. Исследование методов настройки ПИД-регулятора для систем с малыми постоянными времени // Технические науки в России и за рубежом: материалы VIII Междунар. науч. конф., Краснодар, 2019. С. 22—23.

2. Бураков М.В. Нечеткие регуляторы: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2010. 56 с.

3. Справочная система SimInTech [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://help.simintech.ru/#o_simintech/o_simintech.html.

4. Вадутов О.С. Настройка типовых регуляторов по методу Циглера—Никольса: методические указания к выполнению лабораторной работы для студентов, обучающихся по направлениям 210100 «Электроника и наноэлектроника» и 201000 «Биотехнические системы и технологии». Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2014. С. 5—7.

Ссылка для цитирования

Михайленко Л.А., Устименко В.В., Чубарь А.В. Реализация нечёткого супервизора для системы высокого порядка в среде динамического моделирования SIMINTECH // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 11. С. 487—491.



УДК 681.513

Юйхуэй Ху

(Пекинский политехнический институт, Китайская Народная Республика)

bmstubithyh@gmail.com

УПРАВЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ СПУСКЕ В АТМОСФЕРЕ МАРСА С МОДИФИЦИРОВАННЫМ ПИД-РЕГУЛЯТОРОМ

Рассмотрена задача управления траекторией космического аппарата при спуске в атмосфере Марса. Разработаны номинальные траектории для программы изменения угла крена по нормализованной энергии. Представлен новый алгоритм управления ADRC и исследовано его применение при выдерживании номинальной траектории. Проведено моделирование по данным прототипа марсианского спускаемого аппарата «Кьюриосити». Установлено, что управление траекторией с регулятором ADRC повышает точность приземления по сравнению с регулятором ПИД.

Ключевые слова: космический аппарат; спуск в атмосфере Марса; номинальные траектории; регулятор ADRC.

The problem of a spacecraft trajectory control during descent in the atmosphere of Mars is considered. The nominal trajectories for the program of the angle of bank changing according to the normalized energy are developed. A new ADRC control algorithm is presented and its application at maintaining the nominal trajectory is investigated. Modeling on the basis of the data from the prototype of the Curiosity Mars descent vehicle is carried out. It is found that trajectory control with the ADRC regulator improves the landing accuracy compared to the PID regulator.

Keywords: spacecraft; descent into the atmosphere of Mars; nominal paths; ADRC-regulator.

Введение. Исследование Марса входит в число основных направлений исследований дальнего космоса. Важное значение при решении указанной задачи приобретает построение оптимального управления космическим аппаратом (КА) на различных участках полёта, при котором обеспечивается наибольшая эффективность выполнения программ космических миссий. Как правило, процесс отделения КА от орбитального аппарата до мягкой посадки на поверхность Марса делится на стадии входа в атмосферу, спуска в атмосфере и посадки на поверхность с помощью парашюта и тормозных двигательных установок. Спуск в атмосфере занимает самое длительное время и считается самой опасной с точки зрения безопасности и точности полёта [1]. До последнего времени для большинства марсианских зондов применялся неуправляемый спуск, и именно точность приземления зависит от начальных возмущения условий входа и точности навигации КА входа в атмосферу Марса [2]. Отклонение плотности атмосферы от номинальной и аэродинамических характеристик КА от расчётных показателей после долговременного межпланетного перелёта могут привести к рассеиванию конечной точки приземления.

В будущем следует ожидать создания тяжёлых КА, совершающих управляемый спуск на поверхность Марса, для доставки туда крупно-размерных планетных комплексов. Это повысит требования к их управляемости, манёвренности и точности места приземления. Поэтому разработка алгоритма управления траекторией КА при спуске в атмосфере Марса является актуальной задачей.

Как правило, существуют два основных метода формирования алгоритма управления траекторией, обеспечивающих приземление КА в заданной точке и с заданным уровнем точности [3]:

1) управление, направленное на устранение текущих измеренных отклонений координат траектории от расчётных для опорной траектории значений (управление текущим отклонением относительно опорной траектории);

2) управление, направленное на устранение отклонения точки приземления, прогнозируемой по текущим измерениям координат траектории, от опорной (управление конечным состоянием).

В первом случае расчётная траектория предварительно определена с учётом всех специфических характеристик аппарата и си-

стемы управления, атмосферных условий и возмущений. Алгоритм управления «пытается» устранить любые отклонения от опорной траектории и в конечном счёте КА выдерживает расчётную траекторию. Во втором случае траектория планируется с помощью методов бортового прогнозирования по данным текущего состояния и желаемого целевого состояния. Например, при спусках в атмосфере капсулы «Аполлона» и «Союза» использовались заранее определённые траектории [4, 5].

При возвращении «Спейс шаттла» и «Союза» на Землю была разработана бортовая техника для настройки опорной траектории в форме изменения ускорения сопротивления в соответствии с ограничениями дальности полёта [3, 6]. Хотя алгоритмы управления конечным состоянием могут обеспечить более точную посадку на заданном участке, они требуют высокой скорости бортовых вычислений, точных аэродинамических и атмосферных моделей. Сравнение алгоритма управления текущим отклонением относительно опорной траектории и алгоритма управления конечным состоянием для КА, смоделированного в миссии Mars Science Laboratory, приведено в работе [7]. Результат показал, что алгоритм управления текущим отклонением относительно опорной траектории, вероятно, является более подходящим для спуска на Марс. В данной статье исследован алгоритм управления текущим отклонением относительно опорной траектории при спуске КА в атмосфере Марса.

Некоторые марсианские КА могут осуществлять управляемый спуск небольшой подъёмной силой за счёт смещения центра массы аппарата (обеспечивающего ориентацию аппарата под углом к потоку) [8]. Но максимальная величина аэрокосмического качества марсианского КА обычно меньше 0,3 из-за разреженности атмосферы Марса, что приведёт к ограниченной способности управления дальностью и боковыми смещениями точки приземления аппарата при заданных условиях входа.

Для спускаемых аппаратов второго поколения опорные траектории сформированы на основе закона изменения управляющего параметра (угла крена) по заданному профилю в плоскости «скорость — высота» или, что то же самое, в плоскости «скорость — продольная перегрузка» [9, 10]. Но в данной работе опорная траектория спуска в атмосфере Марса определена в номинальной программе изменения ускорения сопротивления по нормализованной энергии на основе работы [11]. Из-за того,

что силу сопротивления можно точно измерить на борту КА, управление траекторией спуска, основанное на профиле ускорения сопротивления, способно уменьшить зависимость от аэродинамических и атмосферных моделей и достичь требуемой точности приземления.

Система управления, устойчивая к отклонению параметров КА от расчётных и к ветровым воздействиям, актуальна в связи со сложной атмосферой Марса. Некоторые алгоритмы управления на основе отслеживания профилей сопротивления были исследованы в работах [12—14]. В работе [15] китайский профессор Хан Цзинцин предложил новый алгоритм управления ADRC, который наследует качество ПИД-регулятора, работает надёжно и устойчив к неточности параметров объекта и внешним возмущениям. В данной статье исследованы работоспособность нового алгоритма управления ADRC и его применение при выдерживании опорной траектории КА на этапе спуска в атмосфере Марса.

Задача управления спуском в атмосфере Марса. Рассмотрим динамическую модель спускаемого аппарата при спуске в атмосфере Марса. Стандартные упрощённые уравнения движения КА с тремя степенями свободы при его спуске в атмосфере Марса имеют вид

$$\dot{\theta} = \frac{V \cos \gamma \cos \psi}{r}; \quad (1)$$

$$\dot{\phi} = \frac{V}{r} \cos \gamma \sin \psi; \quad (2)$$

$$\dot{r} = V \sin \gamma; \quad (3)$$

$$\dot{V} = -D - g \sin \gamma; \quad (4)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{V} \left[L \cos \sigma - \left(g - \frac{V^2}{r} \right) \cos \gamma \right]; \quad (5)$$

$$\dot{\psi} = -\frac{1}{V \cos \gamma} \left(L \sin \sigma + \frac{V^2}{r} \cos^2 \gamma \cos \psi \tan \phi \right), \quad (6)$$

где θ и ϕ — планетоцентрические долгота и широта КА; r — радиальное расстояние от центра Марса до высоты, на которой движется КА; V — скорость КА; γ — угол наклона вектора скорости к местному горизонту; ψ — угол между проекцией вектора скорости на местный горизонт и местной параллелью; σ — угол крена.

В статье используется прототип КА третьего поколения «Кьюрибсити». Параметры эталонной модели КА: масса КА в течение спуска $M = 2804$ кг; площадь миделева сечения

КА $S = 15,9 \text{ м}^2$; сбалансированный угол атаки $\alpha = -15^\circ$.

Аэродинамическая сила, действующая на КА, может быть разложена на подъёмную силу и сопротивление. Ускорение подъёмной силы L и ускорение силы сопротивления воздуха D описываются следующими уравнениями:

$$L = \frac{1}{2} \frac{\rho S C_L}{m} V^2; \quad (7)$$

$$D = \frac{1}{2} \frac{\rho S C_D}{m} V^2. \quad (8)$$

Массовая плотность атмосферы Марса ρ описывается выражением

$$\rho = \rho_0 \exp\left(\frac{r_0 - r}{h_s}\right),$$

где ρ_0 — массовая плотность атмосферы на радиусе r_0 ; h_s — масштабная высота атмосферы Марса.

Коэффициент подъёмной силы C_L и коэффициент сопротивления C_D являются функцией числа Маха M при фиксированном сбалансированном угле атаки и описываются в виде степенного ряда:

$$C_L = \frac{\sum_{i=0}^4 p_i^L M^i}{M^4 + \sum_{j=0}^3 q_j^L M^j}; \quad (9)$$

$$C_D = \frac{\sum_{i=0}^5 p_i^D M^i}{M^5 + \sum_{j=0}^4 q_j^D M^j}, \quad (10)$$

где i и j — степени числа Маха; p_i^L и q_j^L , p_i^D и q_j^D — элементы для вычисления коэффициентов подъёмной силы и сопротивления (табл. 1).

Гравитационное ускорение Марса моделируется как

$$g = \frac{\mu_M}{r^2}, \quad (11)$$

где μ_M — гравитационный параметр Марса.

Управление КА с малым аэродинамическим качеством при спуске в атмосфере «Спейс шаттла» осуществляется путём регулирования угла крена σ , т. е. вращения подъёмной силы вокруг вектора скорости, который может менять величину и направление подъёмной силы в процессе полёта. Система управления крена КА может быть реализована с помощью газоструйных органов. Угол

Таблица 1

**Элементы для расчёта
аэродинамических коэффициентов**

Параметр	C_L	Параметр	C_D
p_0^L	11 720	p_0^D	25 980
p_1^L	-3654	p_1^D	-1022
p_2^L	485,6	p_2^D	-2904
p_3^L	-14,61	p_3^D	678,6
p_4^L	0,4192	p_4^D	-44,33
q_0^L	25 300	p_5^D	1,373
q_1^L	-7846	q_0^L	15 050
q_2^L	1086	q_1^L	1687
q_3^L	-28,35	q_2^L	-2651
—	—	q_3^L	544,1
—	—	q_4^L	-34,11

крена, угловая скорость и угловое ускорение могут варьироваться в следующих пределах:

$$\begin{cases} 0^\circ \leq |\sigma| \leq 90^\circ; \\ |\dot{\sigma}| \leq 20^\circ/\text{с}; \\ |\ddot{\sigma}| \leq 5^\circ/\text{с}^2. \end{cases} \quad (12)$$

В процессе управления КА по углу крена при неизменном балансирующем значении угла атаки $\alpha = \alpha_{\text{бал}}$ в качестве управляющей величины можно рассматривать ускорение сопротивления с точки зрения автоматического управления. Ограничение по динамическому нагреву и перегрузке, действующим на КА, могут быть легко выражены через ограничения лобового сопротивления. Ускорение сопротивления определяется углом крена следующим образом:

$$\ddot{D} = a + b\mu, \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} a = & -\frac{1}{h_s} \dot{D} V \sin \gamma + \frac{1}{h_s} D (D + g \sin \gamma) \sin \gamma + \\ & + \frac{1}{h_s} D \cos^2 \gamma \left(g - \frac{V^2}{r} \right) + 2 \frac{\dot{D}}{V^2} (D + g \sin \gamma) - \\ & - 2 \frac{D}{V^2} (D + g \sin \gamma)^2 - 2 \frac{D \dot{D}}{V} + 4 \frac{Dg}{r} \sin^2 \gamma + \\ & + 2 \frac{D}{V^2} g \cos^2 \gamma \left(g - \frac{V^2}{r} \right); \end{aligned}$$

$$b = -DL \cos \gamma \left(\frac{2g}{V^2} + \frac{1}{h_s} \right);$$

$$\dot{D} = -\frac{1}{h_s} DV \sin \gamma - \frac{2D}{V} (D + g \sin \gamma);$$

$$\mu = \cos \sigma.$$

В работах [11, 16] рассмотрены оптимизация траектории в координатах «ускорение сопротивления—нормализованная энергия» и система управления относительно опорной траектории. Нормализованная энергия \tilde{E} выражается следующим образом:

$$E = \frac{1}{2} V^2 - \frac{\mu}{r}; \tag{14}$$

$$\tilde{E} = \frac{E - E_0}{E_f - E_0}, \tag{15}$$

где E — энергия на единицу массы КА; E_0 и E_f — энергия на единицу массы в начальный момент входа КА в атмосферу $t = t_0$ и в момент ввода в действие системы парашюта $t = t_f$ соответственно.

Значения параметров полёта КА в начальной и конечной точках при спуске приведены в табл. 2 и 3.

Выбор оптимизированных опорных траекторий основан на данных работы [16]. Поскольку плотность атмосферы на большой высоте очень низкая, то сила сопротивления для гашения кинетической энергии КА мала. Поэтому на начальном этапе спуска угол крена $\sigma = -10^\circ$ для обеспечения продольной дальности полёта. На высоте около 25 км ускорение сопротивле-

Таблица 2

Начальное состояние КА

Параметр	Значение
$\theta(t_0), ^\circ$	-90,072
$\varphi(t_0), ^\circ$	-43,898
$r(t_0), \text{км}$	3520,76
$\psi(t_0), ^\circ$	4,99
$V(t_0), \text{м/с}$	5505
$\gamma(t_0), ^\circ$	-14,15

Таблица 3

Конечное состояние КА

Параметр	Значение
$\theta_f, ^\circ$	-73,26
$\varphi_f, ^\circ$	-41,45
$h_f, \text{км}$	7,7

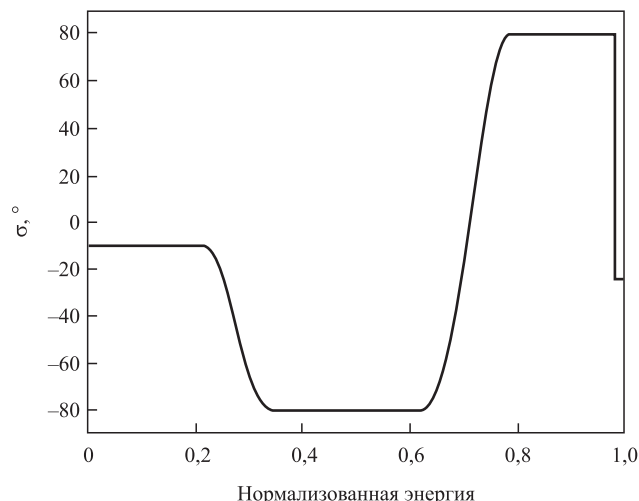


Рис. 1. Номинальная программа изменения угла крена по нормализованной энергии

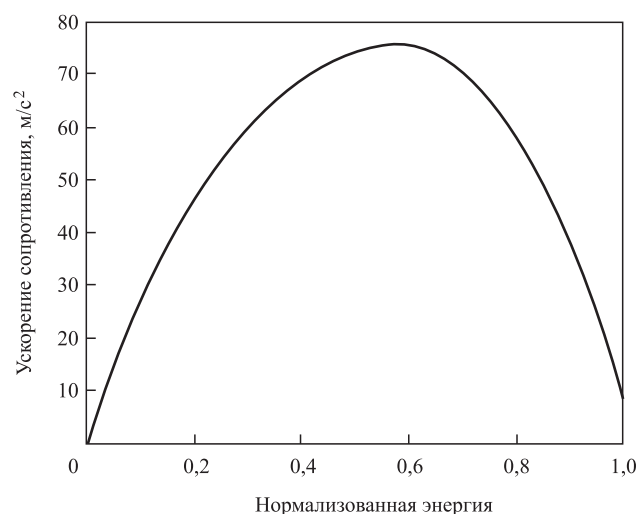


Рис. 2. Номинальная программа изменения ускорения сопротивления по нормализованной энергии

ния достигнет максимума, когда эффективно можно гасить скорость КА. Для достижения большой конечной высоты в точке открытия парашюта нужно обеспечить угол крена КА от -10 до $+80^\circ$. Поворот КА на угол крена от $+80$ до -80° выполняется с учётом удовлетворения расчётной боковой дальности полёта.

Качественный характер изменения опорной траектории спуска КА в атмосфере Марса и сопряжённых переменных показан на рис. 1 и 2.

Регулятор на основе алгоритма управления ADRC. Active Disturbance Rejection Control (ADRC) — новый нелинейный алгоритм управления, используемый в последние годы в различных областях. Он не зависит от точной математической модели объекта, устойчив к изменениям параметров и внешним возмущениям не только в некоторых рабочих зонах, но и во всей рабочей области. Оценивая и

компенсируя влияние внешних возмущающих воздействий различного рода и изменения параметров объекта в режиме реального времени в сочетании с нелинейной обратной связью, алгоритм управления может улучшить статические и динамические характеристики модели, повысить её надёжность и адаптивность.

Регулятор ADRC, который на самом деле является модификацией ПИД-регулятора, состоит из четырёх частей: отслеживающего дифференциатора (TD), наблюдателя расширенного состояния (ESO), нелинейной комбинации обратной связи (NLSEF) и комбинированного управления.

Отслеживающий дифференциатор. Для предотвращения скачка входного сигнала необходимо построить плоский процесс перехода с помощью отслеживающего дифференциатора, чтобы динамическая система быстро отслеживала входной сигнал. Дискретная форма отслеживающего дифференциатора (TD) имеет вид

$$\begin{aligned} P &= \text{fhan}[v_1(k) - v(k), v_2(k), r, h]; \\ v_1(k+1) &= v_1(k) + hv_2(k); \\ v_2(k+1) &= v_2(k) + hP, \end{aligned} \quad (16)$$

где $v_1(k)$ — сигнал отслеживания опорной траектории $v(k)$ в момент $t = kh$; $v_2(k)$ — производная опорной траектории $v(k)$; h — период выборки.

Нелинейная функция $\text{fhan}(x_1, x_2, r, h_0)$ определяется как

$$\left\{ \begin{aligned} d &= rh_0; \\ d_0 &= h_0d; \\ y_0 &= x_1 + h_0x_2; \\ a_0 &= \sqrt{d^2 + 8r|y_0|}; \\ a &= \begin{cases} x_2 + \frac{a_0 - d}{2} \text{sgn}(y_0), & |y_0| > d_0; \\ x_2 + \frac{y_0}{d}, & |y_0| \leq d_0; \end{cases} \\ \text{fhan} &= \begin{cases} r \text{sgn}(a), & |a| > d; \\ r \frac{a}{d}, & |a| \leq d, \end{cases} \end{aligned} \right. \quad (17)$$

где r — фактор скорости; h_0 — коэффициент фильтра.

Наблюдатель расширенного состояния. Рассмотрим систему вида

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2; \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2, w(t), t) + bu; \\ y = x_1, \end{cases} \quad (18)$$

где y — выходной сигнал, измеренный и подлежащий управлению; u — входной сигнал; $f(x_1, x_2, w(t), t)$ — многопараметрическая функция состояний системы, внешних возмущений w и времени t , которая считается суммой возмущений по отношению к рассматриваемой системе, включающей внешнее и внутреннее возмущения из-за неопределённости параметров системы.

Пусть $F(t) = f[x_1, x_2, w(t), t]$ — расширенная переменная состояния, $x_3 = F(t)$ и $\dot{F}(t) = G(t)$, причём величина $G(t)$ неизвестна. Исходную систему в уравнении (18) теперь запишем следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2; \\ \dot{x}_2 = x_3 + bu; \\ \dot{x}_3 = G(t); \\ y = x_1. \end{cases} \quad (19)$$

Наблюдатель расширенного состояния (ESO) в дискретной форме имеет вид

$$\begin{aligned} e &= z_1 - y; \\ \dot{z}_1 &= z_2 - \beta_1 e; \\ \dot{z}_2 &= z_3 - \beta_2 \text{fal}(e, d, \delta) + bu; \\ \dot{z}_3 &= -\beta_3 \text{fal}(e, d_1, \delta), \end{aligned} \quad (20)$$

где e — разница между оцениваемым состоянием и выходным сигналом на предыдущем шаге; z_1 — оцениваемое состояние x_1 ; z_2 — оцениваемое состояние x_2 ; z_3 — оцениваемое расширенное состояние $F(t)$; $d, d_1, \delta, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ — коэффициенты, подлежащие регулировке.

Нелинейная функция $\text{fal}(e, d, \delta)$ имеет следующий вид:

$$\text{fal}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} \frac{e}{\delta^{1-\alpha}}; & |x| < \delta; \\ |e|^\alpha \text{sgn}(e); & |x| \geq \delta, \end{cases} \quad (21)$$

где α, δ — коэффициенты, подлежащие настройке.

Нелинейная обратная связь. При использовании пропорционально-интегрально-дифференциального закона регулирования управляющее воздействие определяется линейной функцией отклонения выходной величины от требуемого значения, его интеграла и производной отклонения в следующем виде [18]:

$$u = k_p e + k_i \int_0^h e d\tau + k_d \frac{de}{dt}, \quad (22)$$

где k_p, k_i, k_d — настроечные параметры регулятора.

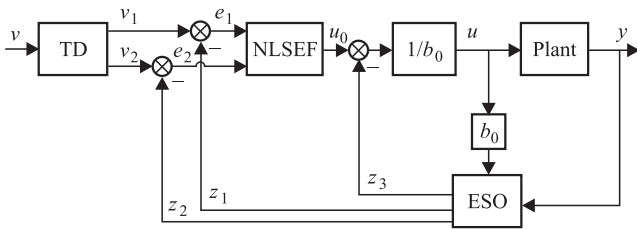


Рис. 3. Регулятор на основе ADRC

Но такая комбинация имеет низкую эффективность регулирования. Именно для повышения быстродействия переходного процесса регулирования используется нелинейная обратная связь следующим образом:

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1; & e_2 = v_2 - z_2; \\ u_0 = \beta_{01} \text{fal}(e_1, \alpha_1, \delta) + \beta_{02} \text{fal}(e_2, \alpha_2, \delta), \end{cases} \quad (23)$$

где e_1 — отклонение оцениваемой управляемой величины от заданной входной величины; e_2 — отклонение оцениваемой производной управляемой величины от производной входной величины; u_0 — управляющее воздействие по отклонению управляемой величины от требуемого значения; β_{01}, β_{02} — коэффициенты, подлежащие настройке.

Комбинированное управление. В ADRC-регуляторе применяется комбинированное управление, при котором управляющее воздействие состоит не только из воздействия по отклонению управляемой величины от требуемого значения, но и внешних возмущающих воздействий и изменений параметров объекта. Управляющее воздействие u , состоящее из отклонения от заданного значения и возмущающих воздействий, имеет вид

$$u = (u_0 - z_3)/b_0, \quad (24)$$

где b_0 — коэффициент, подлежащий настройке.

Общая схема ADRC имеет вид, показанный на рис. 3.

Результаты моделирования выдерживания номинальной программы с использованием регулятора ADRC. На рис. 4 и 5 приведены характеристики работоспособности отслеживающего дифференциатора с вводом номинальной программы изменения ускорения сопротивления по нормализованной энергии. Как видно, отклонение отслеживающего сигнала и его производной от номинальной программы существенны в начале траектории, но в конце сводится к нулю. При этом можно сделать вывод: отслеживающий дифференциатор может отслеживать входные сигналы и их производные с незначительным отклонением от заданных показателей.

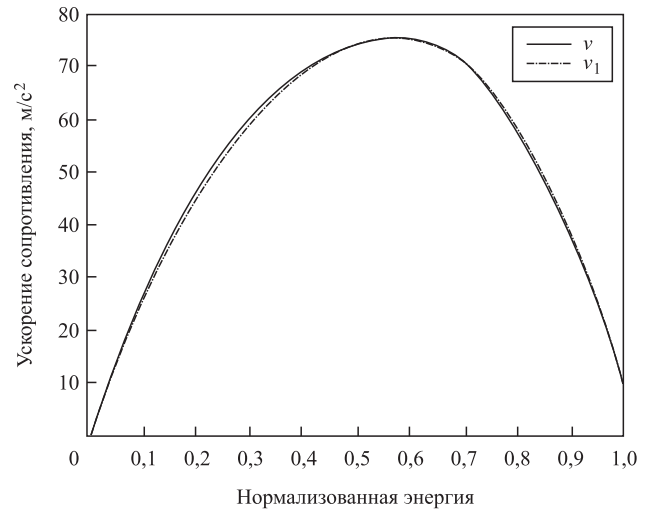


Рис. 4. Номинальные программы изменения ускорения сопротивления по нормализованной энергии:

— — номинальная программа изменения ускорения сопротивления; - - - — номинальная программа изменения ускорения сопротивления, разработанная отслеживающим дифференциатором

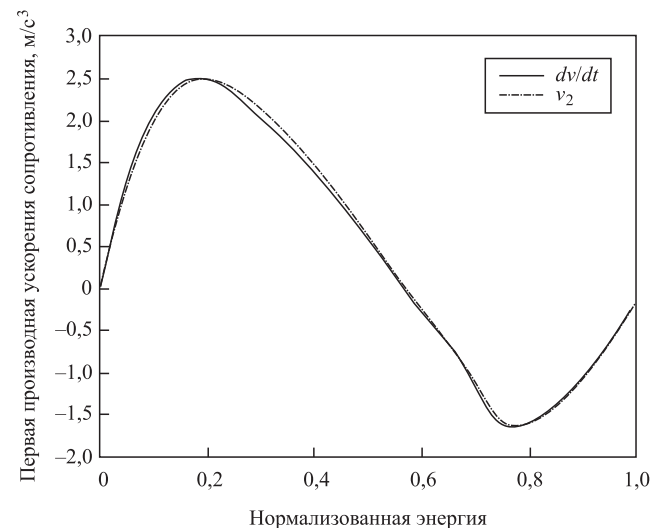


Рис. 5. Номинальные программы изменения производной ускорения сопротивления по нормализованной энергии:

— — номинальная программа изменения производной ускорения сопротивления; - - - — номинальная программа изменения производной ускорения сопротивления, разработанная отслеживающим дифференциатором

На рис. 6 и 7 показаны характеристики работоспособности наблюдателя расширенного состояния. Очевидно, что наблюдатель расширенного состояния способен оценивать состояние системы с высокими точностью и скоростью.

После получения отслеживающего сигнала ускорения сопротивления, его производной, наблюдаемого сигнала ускорения сопротивления и его производной осуществляется не-

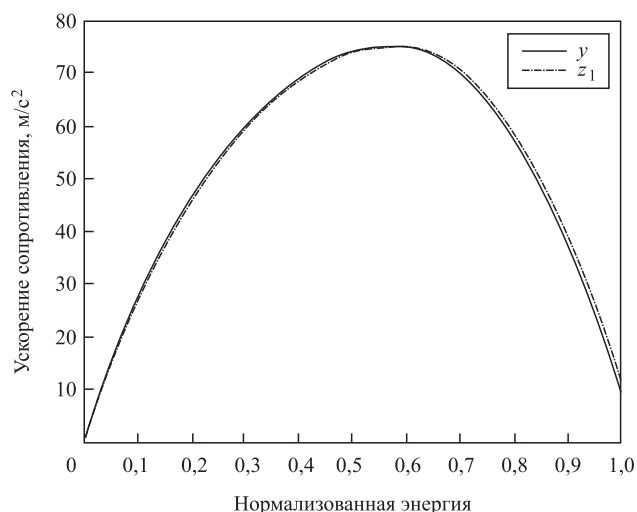


Рис. 6. Номинальные программы изменения ускорения сопротивления по нормализованной энергии:

— — изменение ускорения сопротивления, измеренное бортовым оборудованием; - - - — изменение ускорения сопротивления, оцениваемое наблюдателем расширенного состояния

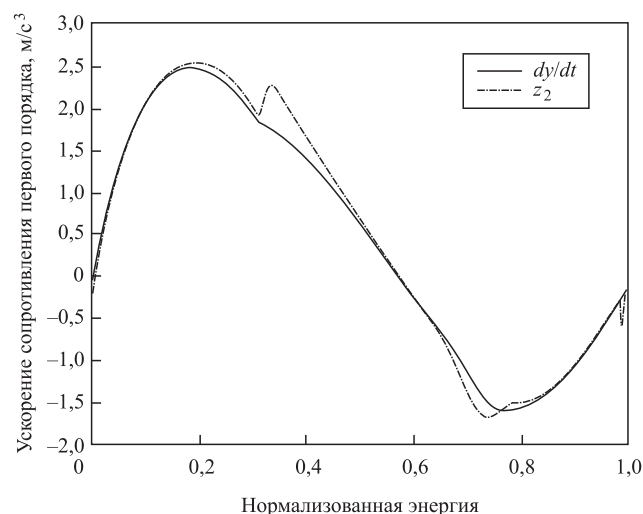


Рис. 7. Номинальные программы изменения производной ускорения сопротивления по нормализованной энергии:

— — изменение ускорения сопротивления, измеренное бортовым оборудованием; - - - — изменение производной ускорения сопротивления, оцениваемое наблюдателем расширенного состояния

линейная обратная связь ошибки состояния с компенсацией возмущения. Результаты выдерживания номинальной траектории с регулятором ПИД, регулятором ADRC и их сравнения приведены на рис. 8 и 9.

Как показано на рис. 9, изменение угла крена при полёте с использованием регулятора ADRC совпадает с большей частью номинальной программы изменения угла крена, и колебания по углу крена, возникающие из-за

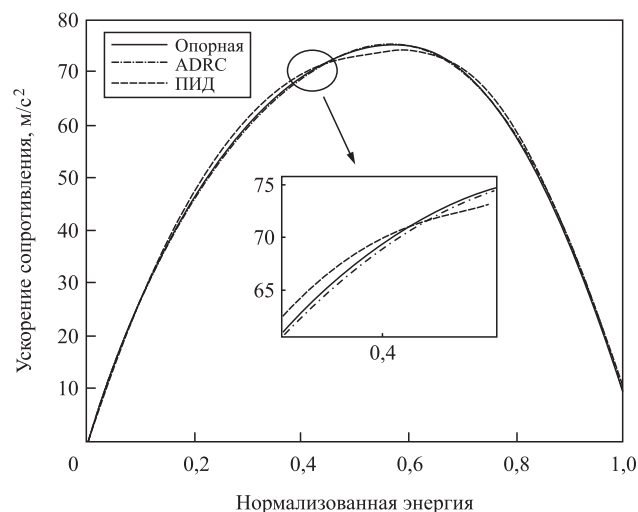


Рис. 8. Выдерживание номинальной программы изменения ускорения сопротивления по нормализованной энергии:

— — номинальная траектория; - - - — реализуемая траектория с регулятором ADRC; - - - — реализуемая траектория с регулятором ПИД

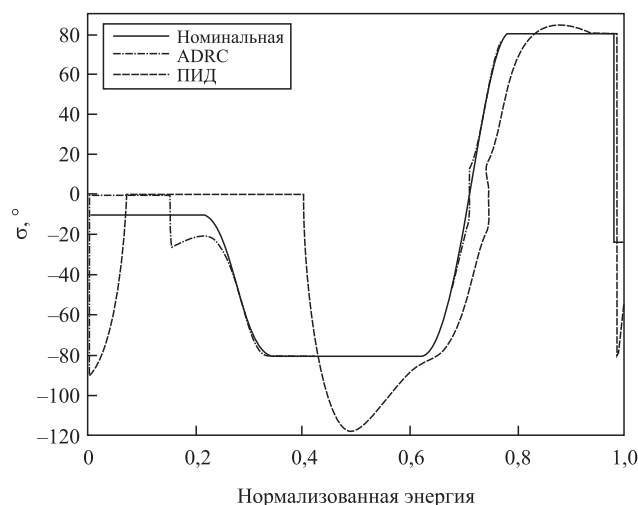


Рис. 9. Регулирование угла крена, соответствующее выдерживанию номинальной программы изменения ускорения сопротивления D по нормализованной энергии \tilde{E} :

— — номинальная траектория; - - - — реализуемая траектория с регулятором ADRC; - - - — реализуемая траектория с регулятором ПИД

скачков в номинальной зависимости $\sigma(\tilde{E})$, затухают достаточно быстро. Это можно объяснить тем, что оценивание и компенсирование влияния внешних возмущающих воздействий и изменения параметров объекта способны улучшить качество переходного процесса и уменьшить установившиеся составляющие ошибки.

Симуляция полёта по номинальной траектории длилась 217 с с конечной скоростью

553,7 м/с, спускаемый аппарат находился в конечной точке с координатами $\theta_f = -73,5256^\circ$, $\varphi_f = -41,4997$ на высоте $h_f = 7,7$ км.

Моделирование полёта по реализуемой траектории с регулятором ADRC длилось 217 с с конечной скоростью 553,3 м/с, спускаемый аппарат находился в конечной точке с координатами $\theta_f = -73,5255^\circ$, $\varphi_f = -41,4830$ на высоте $h_f = 7,81$ км.

Моделирование полёта по реализуемой траектории с регулятором ПИД длилось 210 с с конечной скоростью 603,3 м/с, спускаемый аппарат находился в конечной точке с координатами $\theta_f = -73,6949^\circ$, $\varphi_f = -41,5395$ на высоте $h_f = 7,79$ км.

Вывод. Моделирование по данным эталонной модели спускаемого аппарата третьего поколения «Кьюриосити» показало, что управление траекторией при спуске в атмосфере Марса с использованием номинальной программы изменения угла крена по нормализованной энергии с регулятором ADRC достигает высокой точности приземления.

Библиографические ссылки

1. Дивеев А.И., Северцев Н.А., Шмалько Е.Ю. Синтез системы управления спуском космического аппарата в атмосфере Марса // Труды Международного симпозиума «Надёжность и качество». 2011. № 2. С. 379—380.
2. Xia Y., Chen R., Pu F. Active disturbance rejection control for drag tracking in mars entry guidance // Advances in Space Research. 2014. Vol. 53(5). P. 853—861.
3. Андриевский В.В. Динамика спуска космических аппаратов на Землю. М.: Машиностроение, 1970. 235 с.
4. Morth R. Reentry Guidance for Apollo. Massachusetts Inst. Of Technology Instrumentation Lab. Rept. R-532. 1966. Vols. 1—2. Cambridge. MA.
5. Аношин Ю.М., Бобылев А.В., Ярошевский В.А. Управление траекторией космического аппарата с малым аэродинамическим качеством при спуске в атмосфере // Ученые записки ЦАГИ. 2012. № 5.
6. Harpold J.C., Graves C.A. Shuttle Entry Guidance // J. of the Astronautical Sciences. 1979. Vol. 27. No. 3. P. 239—268.
7. Kluever C.A. Entry guidance performance for mars precision landing // J. of Guidance, Control and Dynamics. 2008. Vol. 31 (6). P. 1537—1544.
8. Баженов В.И., Осин М.И. Посадка космических аппаратов на планеты. М.: Машиностроение, 1978. 159 с.
9. Соколов Н.Л., Орлов Д.А. Проектно-баллистические исследования проблемы спуска космических аппаратов в атмосфере Марса // Вестник МАИ. № 1. 2016.
10. Казаковцев В.П. Коррекция траектории перехода космического аппарата на круговую орбиту спутника при использовании торможения в атмосфере в условиях неопределенности ее параметров // Вестник МГТУ им. М.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». № 5. 2015. С. 38—46.
11. Mendek G.F., Carman G.L. Guidance design for mars smart landers using the entry terminal point controller // AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit. 2002. P. 4502.
12. Tu K.Y., Munir M.S., Mease K.D., Bayard D.S. Drag-based predictive tracking guidance for mars precision landing // J. of Guidance, Control and Dynamics. 2000. Vol. 23 (4). P. 620—628.
13. Saraf A., Leavitt J.A., Chen D.T., Mease K.D. Design and evaluation of an acceleration guidance algorithm for entry // J. of Spacecraft Rockets. 2004. Vol. 41 (6). P. 960—966.
14. Mease K.D., Kremer J.P. Shuttle entry guidance revisited using nonlinear geometric method // J. of Guidance, Control and Dynamics. 1994. Vol. 17 (6). P. 1350—1356.
15. Han J.Q. From PID to active disturbance rejection control // IEEE Trans. Ind. Electron. 2009. Vol. 56 (3). P. 900—906.
16. Manrique J.B. Advances in spacecraft atmospheric entry guidance. University of California, Irvine, 2010. P. 115—120.
17. Вадутов О.С. Синтез дискретных систем с ПИД-регулятором // Известия Томского политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2008. № 312 (5). С. 48—52.

Ссылка для цитирования

Юйхуэй Ху. Управление траекторией космического аппарата при спуске в атмосфере Марса с модифицированным ПИД регулятором // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 11. С. 492—499.

Уважаемые читатели!

Редакция предлагает руководителям организаций, ищущих новые рынки для реализации своей продукции, услуги по размещению рекламы и объявлений.

Цены за публикацию умеренные.

УДК 004.942

Г.С. Иванова, А.И. Жильцов, М.В. Фетисов, Н.А. Чулин, А.Е. Юдин
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

k_iu6@bmstu.ru; iu1@bmstu.ru

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Приведён краткий анализ ограничений, присущих системам моделирования MatLab, Scilab, Modelica и т. п. Предложен подход к построению нового типа систем моделирования, адаптивных к языку описаний модели конкретной предметной области. Рассмотрены требования к описанию сложных моделей, связанные с использованием современных технологий разработки программного обеспечения, а также приведён пример формирования предметно-ориентированного языка для системы дифференциальных уравнений в нормальной форме.

Ключевые слова: имитационное моделирование; система моделирования; динамическая система; сложность; модель; адаптивность.

A brief analysis of the limitations inherent in the modeling systems MatLab, Scilab, Modelica, etc. is given. An approach to the construction of a new type for modeling systems, adaptive to the language of describing the model of a specific subject area, is proposed. The requirements for the description of complex models associated with the use of modern software development technologies are considered. An example of the formation of a domain-oriented language for a system of differential equations in normal form is given too.

Keywords: simulation modelling; modelling system; dynamic system; complexity; model; adaptability.

Введение. Компьютерное имитационное моделирование динамических систем играет важную роль в разработке больших систем, позволяя проверить алгоритмы, проектные и конструкторские решения перед тем, как воплотить их «в железе». Сложность таких систем растёт, что предъявляет к имитационным моделям всё более высокие требования. Речь может идти, например, об имитационном моделировании в реальном времени взаимодействия сотен разных или схожих полноценных математических моделей летательных аппаратов и других объектов с необходимостью периодического изменения структуры и сценария взаимодействия, а также быстрой модификации параметров и состава моделей. При этом часть объектов может иметь полунатурное исполнение, а часть — управляться в ручном режиме.

Современные средства моделирования (MatLab [1], Scilab [2], Modelica [3] и др.) базируются на языке программирования, общем для описания всех моделей, а также наборе библиотек для поддержки различных направлений исследований.

Проблема построения сложных моделей с применением указанных средств не столько в том, что специалистам конкретной предметной области необходимо изучить язык какой-либо системы моделирования (MatLab, Scilab, Modelica и т. д.) и библиотеку, связанную с реализацией его предметной области, а в том, чтобы

составить большую подробную модель. Язык, поддерживаемый той или иной системой моделирования, как правило, не предусматривает полноценной поддержки объектно-ориентированной парадигмы программирования [4, 5], а использование языка в рамках правил работы с системой моделирования и библиотеками часто сводит такую поддержку к минимуму.

Например, чтобы реализовать выполнение численного интегрирования системы нелинейных дифференциальных уравнений в любой из указанных систем, необходимо выполнить предварительное преобразование этих уравнений в текст на языке системы, а затем воспользоваться библиотекой численных методов интегрирования. Для одного объекта эти действия не столь сложны, но если объектов много, они связаны между собой и требуют применения других библиотек, то значительная часть времени по созданию всей модели уйдет на поиск программных решений в рамках той или иной системы моделирования, не позволяя в полной мере сосредоточиться непосредственно на задачах предметной области, отвлекая пользователей на постоянное решение проблем реализации всё более усложняющейся модели. Эта проблема свойственна всем системам моделирования, построенным на едином языке программирования. В системе Modelica, например, за счёт более продуманной объектной модели её мо-

дулей, порог сложности моделей отодвигается, но всё равно ограничивается единым языком.

Однако можно существенно упростить описание модели, если сначала «научить» систему моделирования воспринимать запись дифференциальных уравнений и других форм описания модели, а далее просто записывать модель в привычном для специалиста виде, не отвлекаясь на специфические языковые конструкции и технические особенности той или иной системы моделирования.

Следующая важная проблема, которую необходимо рассмотреть — внеязыковая работа со сложными моделями. В этой сфере можно обратиться к опыту разработки сложного программного обеспечения (ПО) и выделить следующие особенности как сложного ПО, так и сложных моделей:

- комплексность, т. е., собственно, сложность, которая проявляется в большом количестве объектов, моделей, их вложенности друг в друга и связями между ними;

- длительный жизненный цикл, т. е. необходимость не только разработать ПО или модель, но и поддерживать их развитие на протяжении длительного времени;

- работа разработчиков в команде, что подразумевает невозможность создавать и поддерживать сложное ПО или модель в одиночку за приемлемое время, а также устойчивость проекта в условиях изменения состава команды.

В настоящее время при разработке ПО высокой сложности достигнуты впечатляющие результаты. Рассмотрим основные технологии, которые применяются при создании и сопровождении современного сложного ПО:

- статический анализ кода, который позволяет выявлять потенциальные ошибки на раннем этапе разработки [6];

- средства формальной верификации к особенно критичным алгоритмам [7];

- интегрированные среды разработки, позволяющие не только организовать рабочий процесс, сфокусировав внимание на написании кода или модели, но также (и это, пожалуй, главное в современных средах) выполнять раннюю диагностику ошибочных и потенциально некорректных состояний кода, используя средства статического анализа кода;

- системы управления версиями, которые позволяют организовать работу больших коллективов разработчиков с исходными текстами и другими артефактами ПО;

- средства модульного тестирования, позволяющие составлять тесты завершённых элементов ПО, обеспечивающие регрессионное тестирование всего проекта [4];

- средства непрерывной интеграции и непрерывного развёртывания (часто обозначаются как CI/CD — Continuous Integration / Continuous Delivery) [8, 9];

- самодокументирование кода [5];

- использование распределённых вычислений и др.

При построении сложной модели важно учитывать опыт разработки сложного ПО, а значит использование перечисленных технологий.

Адаптивная система моделирования. Для преодоления ограничений, которые возникают при разработке сложных моделей, предлагается создать адаптивную систему моделирования, которая соответствует определённым требованиям.

Во-первых, она должна быть настраиваемой на язык конкретной предметной области. Для указанной настройки может быть использовано встроенное в систему средство формирования грамматики языка описания модели и описание среды исполнения этой модели. Такой подход позволит создать лёгкую для использования специалистами среду моделирования, скрыв от них внутреннюю реализацию и использование специализированных библиотек, что уменьшит вероятность ошибок и даст возможность создавать более сложные модели.

Во-вторых, необходимо, чтобы описание модели выполнялось таким образом и система в целом была построена так, чтобы можно было в максимальной мере использовать технологии, применяемые при разработке сложного ПО. Для этого должен применяться императив текстового описания модели, т. е. описание модели должно выполняться в текстовом виде на предметно-ориентированном языке (ПОЯ), близком к языку предметной области [10]. Для графических представлений также предпочтителен специализированный текстовый формат описания (например, DOT [11]), который вписывается в предложенную парадигму, так как может быть интерпретирован как ПОЯ графического представления.

Таким образом, перспективная система моделирования должна представлять собой набор ПОЯ, по возможности объединённых некоторой базовой грамматикой и семантикой, чтобы облегчить переход от одного описания к другому. Общая базовая грамматика и семантика позволят также упростить разработку такой системы моделирования. Можно сказать, что набор ПОЯ будет являться диалектами базового языка, виртуально присутствующего в виде общих правил грамматики и общей семантики (рис. 1).

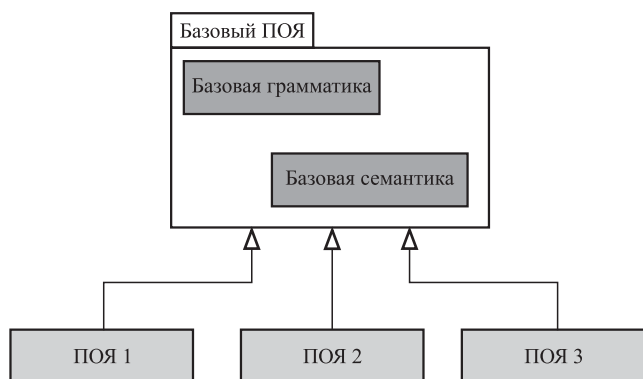


Рис. 1. Диалекты ПОЯ адаптивной системы моделирования

Так, базовыми могут быть правила с общей грамматикой выражений и семантикой, определяющей, например, приоритет операций или правила вывода типов. Конкретные ПОЯ могут модифицировать базовые правила в любой степени, если это необходимо, но база в любом случае должна быть общей.

Для реализации описанного подхода целесообразно создать встроенный генератор компиляторов ПОЯ с заготовками базовых правил, а также предоставить специалистам предметных областей возможность создавать скрипты, изменяющие правила формирования абстрактного синтаксического дерева (АСД) [12] для конкретных ПОЯ, а также выполняющие анализ сформированного АСД и генерации кода по нему. Генерацию кода целесообразно выполнять в промежуточное представление (IR, Intermediate Representation), которым может выступать код на языке C/C++, а в перспективе, IR LLVM [13] или другие инфраструктуры поддержки компиляторов (рис. 2).

Важно заметить, что швейцарский учёный Н. Вирт (и не только он) в своё время критиковал реализацию встроенных генераторов компиляторов, предлагая использовать распространённые внешние генераторы [14], например, YACC [15] или Bison [16]. Однако в условиях компактного описания потенциально большого количества диалектов ПОЯ, их частой уточняющей правки, канонический подход представляется излишне громоздким.

В самом простом виде адаптивная система моделирования может состоять только из компилятора описания модели в исполняемый код. Однако целесообразно предусмотреть интегрированную среду разработки (рис. 3), которая позволит использовать многие современные технологии, применяемые при разработке сложного ПО, например, синтаксическую и семантическую подсветку текста в редакторе, статический анализ описания модели, инте-

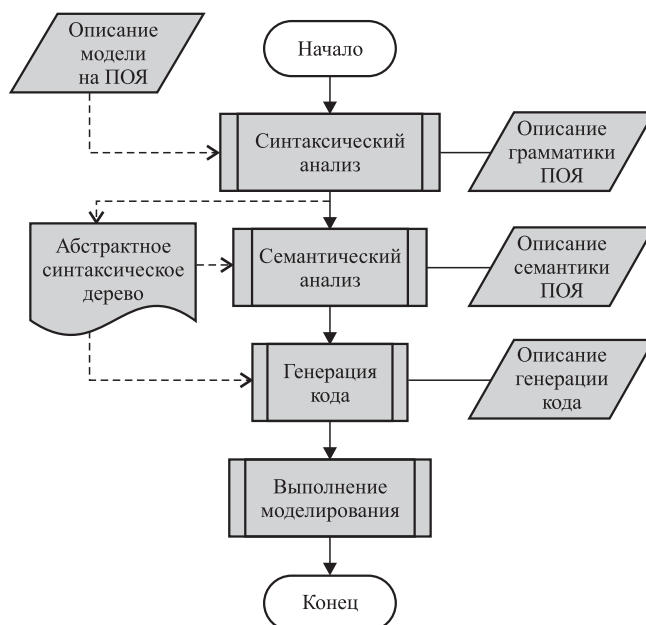


Рис. 2. Упрощённая схема обработки описания модели перед моделированием в адаптивной системе моделирования

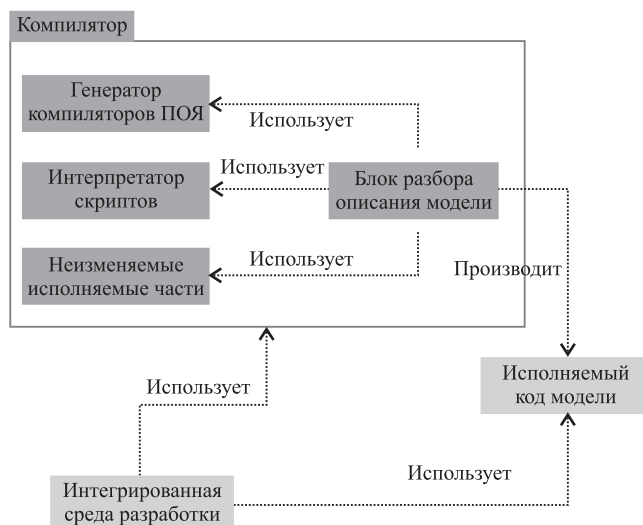


Рис. 3. Диаграмма взаимодействия составных частей адаптивной системы моделирования

грацию с системой контроля версий и другие инструменты, которые должны упростить формирование сложных моделей.

Рассмотрим в качестве примера систему дифференциальных уравнений в нормальной форме. Запись грамматики соответствующего ПОЯ должна быть выполнена на некотором специализированном языке описания, позволяющем задавать дополнительные атрибуты как всему языку, так и отдельным его элементам. На рис. 4 представлена такая запись.

Важно отметить, что в качестве базового языка используется язык математических выражений, грамматика которого «expression» включается в новый ПОЯ как его часть. Запись

Библиографические ссылки

1. **MatLab Documentation.** MathWorks [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/index.html> (дата обращения: 16.10.2019).
2. **Scilab. Tutorials** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.scilab.org/tutorials> (дата обращения: 17.11.2019).
3. **Modelica Language Specification.** Version 3.4 (PDF). Modelica Association. 2017-04-10 [Электронный ресурс]. URL: <https://modelica.org/documents/ModelicaSpec34.pdf> (дата обращения: 16.10.2019).
4. **Иванова Г.С.** Технология программирования: учебник. М.: Кнорус, 2014. 333 с.
5. **Эванс Э.** Предметно-ориентированное проектирование (DDD): структуризация сложных программных систем. СПб.: ООО «Диалектика», 2019. 448 с.
6. **Кармак Д.** Статический анализ кода [Электронный ресурс]. URL: <https://www.viva64.com/ru/t/0046> (дата обращения: 16.10.2019).
7. **Кулямин В.В.** Методы верификации программного обеспечения [Электронный ресурс]. URL: <http://panda.ispras.ru/~kuliamin/docs/VerMethods-2008-ru.pdf> (дата обращения: 16.10.2019).
8. **Booch G., Maksimchuk R.A., Engle M.W.** etc. Object Oriented Design: With Applications. Addison-Wesley. 2007. 717 с.
9. **Эберхард В.** Практика непрерывных апдейтов. СПб.: Питер, 2018. 320 с.
10. **Фаулер М.** Предметно-ориентированные языки программирования. М.: Вильямс. 2011. 577 с.
11. **Gansner E.R., Koutsofios E., North S.** Drawing graphs with dot [Электронный ресурс]. URL: <http://www.graphviz.org/pdf/dotguide.pdf> (дата обращения: 26.10.2019).
12. **Ахо А.В., Лам М.С., Сети Р., Ульман Д.Д.** Компиляторы: принципы, технологии и инструментарий, 2-е изд. М.: Вильямс, 2018. 1184 с.
13. **LLVM Compiler Infrastructure. Documentation** [Электронный ресурс]. URL: <https://llvm.org/docs> (дата обращения: 16.10.2019).
14. **Вирт Н.** Построение компиляторов. М: ДМК Пресс, 2016. 192 с.
15. **BYACC — Berkeley Yacc — Generate LALR(1) parsers** [Электронный ресурс]. URL: <https://invisible-island.net/byacc/byacc.html> (дата обращения: 04.11.2019).
16. **GNU Bison** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gnu.org/software/bison> (дата обращения: 04.11.2019).

Ссылка для цитирования

Иванова Г.С., Жильцов А.И., Фетисов М.В., Чулин Н.А., Юдин А.Е. Адаптивная система моделирования // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 11. С. 500—504.

УДК 681.513

Н.В. Лукьянова, канд. техн. наук, доц., **А.А. Полякова**
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

neysipin@mail.ru

МОДУЛЬНЫЙ МЕТОД ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ САМОНАВЕДЕНИЯ

Исследован модульный метод полунатурного моделирования сложных динамических систем. Рассмотрен динамический стенд полунатурного моделирования для исследования головки самонаведения. Использован моделирующий комплекс, включающий в себя модели головки самонаведения, динамики беспилотного летательного аппарата, внешней среды функционирования. Модели построены с помощью эволюционных алгоритмов.

Ключевые слова: полунатурное моделирование; моделирующий стенд; модульный метод; головка самонаведения; беспилотный летательный аппарат; эволюционный алгоритм.

A modular method of semi-natural modeling of complex dynamic systems is investigated. A dynamic stand of semi-natural modeling for research of the homing head is considered. A modeling complex, which includes models of the homing head, the dynamics of an unmanned flying vehicle, and the external environment of functioning is used. The models are built by using evolutionary algorithms.

Keywords: semi-natural modeling; simulation stand; modular method; homing head; unmanned flying vehicle; evolutionary algorithm.

Введение. Решение проблемы сокращения сроков проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ и освоения разработок представляется возможным при

широком внедрении моделирования в технологический процесс. Провести аналитические исследования современных информационно-управляющих систем практически не удаётся.

Поэтому неотъемлемой частью проектирования становится имитационное моделирование, особенно полунатурное, с заменой ряда звеньев контура управления изготовленными блоками реальной аппаратуры. На стадии разработки системы оно даёт возможность уточнить основные характеристики уже изготовленных элементов, а также выбрать оптимальные характеристики и параметры проектируемых элементов. После завершения разработки полунатурное моделирование используется для того, чтобы сократить круг вопросов, выносимых в дальнейшем на испытания.

Метод полунатурного моделирования предполагает, что используется часть реальных устройств системы. Включенная в такую полунатурную модель ЭВМ имитирует работу остальных устройств системы, отображённых математическими моделями [1—3]. Однако в большинстве случаев этот метод также связан со значительными затратами и трудностями, в частности аппаратной стыковки натуральных моделей с ЭВМ.

В замкнутую модель наряду с реальной аппаратурой могут входить имитаторы, математические модели внешней среды, воздействий и помех и процессов, для которых достаточно точное математическое описание неизвестно. Включение реальной аппаратуры или реальных систем в контур моделирования сложных процессов позволяет исследовать процессы, для которых нет точного математического описания и уменьшить априорную неопределённость.

Проблема создания авиационных комплексов и их составных частей имеет комплексный научно-технический, организационный и производственный характер. Как известно, испытания, и особенно лётные, являются наиболее сложным, длительным, дорогостоящим и сопряжённым с большим риском этапом создания авиационной техники. В целях сокращения продолжительности и стоимости этапа лётных испытаний и, как следствие, всего цикла создания авиационной техники проводятся наземные разработки и испытания с использованием полунатурного моделирования. При применении полунатурного моделирования сокращаются сроки разработки изделия, практически исключается вероятность ошибок при проектировании, а главное, исключаются опасные ситуации. Особенностью полунатурных методов моделирования является возможность подробного исследования режимов работы системы. Эти режимы могут быть

исследованы с помощью модели генератора внешнего управляющего воздействия и физической модели критического элемента во всем диапазоне возможных изменений части параметров внешнего воздействия, чего натурными экспериментами не всегда возможно достичь.

При проектировании сложных систем управления динамическими процессами или объектами, в частности систем управления движением летательных аппаратов (ЛА), полунатурное моделирование применяется для корректировки алгоритмов обработки информации и управления, уточнения и корректировки их параметров с учётом динамических особенностей и характеристик элементов реального оборудования, работающих в контуре управления, а также для оценки показателей качества проектируемых систем управления и изучения их эксплуатационных характеристик на заключительном этапе.

В процессе полунатурного моделирования успешно объединяются преимущества математического и натурального моделирования и достигается оптимальное взаимодействие между вычислительными и натурными экспериментами. Осуществляется обмен информацией между вычислительными средствами моделирующего комплекса и элементами реального оборудования. Эта особенность приводит к необходимости синхронизировать вычислительный процесс с реальным временем, что, в свою очередь, обуславливает высокие требования к организации вычислительной среды комплекса, структуре вычислительных процедур и средств сопряжения цифровой части и элементов реального оборудования. Одной из наиболее сложных систем авиационных комплексов является головка самонаведения (ГСН). Отработка типовых и особенно сложных режимов работы ГСН осуществляется с использованием моделирующего стенда и модульного метода полунатурного моделирования [4].

Полунатурное моделирование ГСН. При разработке систем управления и наведения движущихся объектов используется полунатурное моделирование с динамическими стендами. Проведение полунатурного моделирования ГСН предполагает использование математической модели, описывающей движения ГСН, как правило, в режиме реального времени; динамического стенда, преобразующего выходное напряжение модели в угловое перемещение исследуемой ГСН, установленной на подвижной платформе.

Полунатурное моделирование, как правило, проводится на специальных стендах, на которых элементы реальной системы и устройства-имитаторы объединяются в замкнутый контур, образуя полную модель системы. Стенд полунатурного моделирования — это одно-, двух-, трёх-, многостепенная динамическая моделирующая система для имитации угловых движений ГСН и беспилотного ЛА (БПЛА) относительно центра масс, а также различные узлы перемещения источников излучения разных спектральных диапазонов для воспроизведения углового движения линии визирования.

Динамический стенд, в сущности, представляет собой точный электромеханический преобразователь, предназначенный для сообщения угловых перемещений установленным на нём секциям системы управления или наведения или чувствительным элементам (датчикам), реагирующим на угловые перемещения, скорости или ускорения. Динамический стенд оборудуется следящими системами с чрезвычайно высокими статическими и динамическими характеристиками, значительно превышающими характеристики моделируемой системы, с тем чтобы при моделировании не вносились искажения, обусловленные ошибками слежения в рабочей полосе частот исследуемого объекта. Точность следящей системы динамического стенда должна находиться в пределах точности вычислительных устройств. Блок-схема стенда полунатурного моделирования представлена на рисунке.



Блок-схема полунатурного стенда:

СУ — система управления; БУ — блок управления

Решение системы уравнений в виде напряжений преобразуется в перемещение платформы, соответствующее действительным движениям исследуемого БПЛА в пространстве под действием внешних возмущений.

Метод полунатурного моделирования с динамическими стендами позволяет воспроизводить в лабораторных условиях режимы работы, близкие к реальным, и тем самым помогает решить следующие вопросы:

исследование динамики систем управления и их элементов;

выбор оптимальных параметров с точки зрения точности системы;

исследование поведения объекта в полёте и перекрестных связей;

исследование надёжности автоматических систем и прогнозирование ресурса системы самонаведения;

отладка и испытания системы при контрольных, приёмосдаточных испытаниях и перед лётными испытаниями.

Полунатурное моделирование по разомкнутой цепи. Цепь «математическая модель — динамический стенд» не замкнута. Вычислитель рассматривается как задатчик сигналов возмущения, а динамический стенд — в качестве преобразователя этих сигналов в механические перемещения. Исследования по разомкнутой цепи представляют интерес в основном в трёх случаях:

определение характеристик ГСН;

определение динамических характеристик инерциальных элементов (датчиков ускорения);

исследование влияния окружающих условий (факторов полёта).

Стенд полунатурного моделирования содержит излучатель сигналов; устройство, которое изменяет сигнал в соответствии с интерференционным коэффициентом отражения от подстилающей поверхности; ГСН; вычислительное устройство моделирования (ВМУ). ГСН и излучатель сигналов зафиксированы на неподвижном основании так, что его продольная ось основания совмещена с продольной осью ГСН. ВМУ включает в себя блоки моделей динамики БПЛА, модели движения цели, модели движения гиросtabilизированной платформы, модели управления гиросtabilизированной платформой, модели расчёта вектора «БПЛА — цель» и дальности «БПЛА — цель». Стенд полунатурного моделирования позволяет проводить полунатурное моделирование системы самонаведения БПЛА без искажения динамики контура наведения системы

с учётом влияния подстилающей поверхности в режиме реального времени.

Испытательный стенд содержит ГСН, динамический стенд воспроизведения углового движения ГСН, радиоимитатор цели, включающий в себя излучатель сигналов. Источник сигнала установлен на подвижной платформе, которая имитирует движение цели. ГСН использует динамическую подставку для отслеживания движения излучателя сигнала. Недостатком известных испытательных стендов полунатурного моделирования является отсутствие учёта изменения сигнала, отражённого от цели, по амплитуде и фазе из-за влияния подстилающей поверхности.

Рассматриваемый испытательный стенд имеет возможность осуществлять полунатурное моделирование в условиях влияния подстилающей поверхности на управляемость ГСН БПЛА. Головка самонаведения установлена на гиросtabilизированной платформе, излучатель сигналов зафиксирован на неподвижном основании и выполнен в виде генератора электромагнитных сигналов, вычислительное устройство содержит блоки моделей динамики движения ЛА, модели движения цели, модели движения гиросtabilизированной платформы, модели управления гиросtabilизированной платформой.

Полунатурное моделирование по замкнутой цепи. Наряду с реальной аппаратурой в замкнутый контур моделирования могут входить имитаторы воздействий и помех, математические модели внешней среды и процессов, для которых неизвестно достаточно точное математическое описание. При работе в замкнутом контуре вычислитель решает уравнения, описывающие аэродинамику и кинематику движущегося объекта в режиме реального времени, а динамический стенд играет роль имитатора, воспроизводящего угловые перемещения объекта. Сигналы датчиков ускорений (или гироскопов) головки самонаведения, установленных на стенде, поступают в вычислитель, осуществляя замыкание цепи полунатурного моделирования. Эффективность функционирования стенда полунатурного моделирования в большой степени зависит от адекватности используемых математических моделей. Априорные модели, сформированные на основе физических и других законов, часто не отличаются высокой точностью, поэтому используются модели с идентификацией [5—9] или модели, построенные эмпирическими методами [10—13].

Процесс синтеза модели на основе системного подхода включает в себя следующие этапы: формирование требований к модели системы исходя из цели исследований на основе исходных данных, в которые включаются назначение модели, условия работы системы, внешняя среда для системы и накладываемые ограничения;

определение подсистем модели, основанное на системном действии, необходимом для выполнения задания системы;

на основе полученных при моделировании данных подбор элементов подсистем модели для реализации этих подсистем;

выбор компонентов будущей модели.

Полученная модель представляет собой интегрированное целое. Создание структуры и характеристик системы, обеспечивающих заданные ей свойства, предполагает синтез модели.

Моделирование предпочтительно осуществлять по замкнутому контуру. Стенд используется прежде всего как вычислительное устройство с высокими характеристиками, т. е. в этом случае динамический стенд входит в цепь математического моделирования сложной системы. Стенд с управляющей ЭВМ представляет собой мощное вычислительное устройство для решения ряда сложных проблем, связанных с анализом и синтезом системы управления, т. е. позволяет осуществить полное пространственное моделирование траектории управляемого объекта, инерциальные элементы которого устанавливаются на стенде, в целях выбора оптимальной структуры системы наведения.

При разработке системы наведения используется имитатор цели, воздействующий, например, на чувствительные элементы ГСН. Установленные на рулях БПЛА датчики углов отклонения выдают сигналы в модель, осуществляя замыкание контура моделирования.

Имитаторы цели бывают неподвижными и движущимися. В обоих случаях они представляют собой точечный источник, установленный на расстоянии, зависящем от длины линии задержки.

С помощью неподвижных имитаторов цели можно проводить:

определение влияния шума цели на устойчивость полной ракеты (ракеты с системой наведения);

проверку устойчивости ракеты с новыми элементами;

исследование влияния минимальной интенсивности сигнала на устойчивость полной ракеты.

С помощью движущегося имитатора можно выполнить все исследования, проводимые по замкнутому контуру совместно с реальной ГСН, которая целиком устанавливается на динамическом стенде.

Так как точность полунатурного модульного моделирования в большой степени зависит от адекватности используемых математических моделей, то для построения адекватных моделей по измерительным выборкам используются эволюционные алгоритмы: нейронные сети, алгоритмы самоорганизации и генетические алгоритмы.

Библиографические ссылки

1. Александров А.А., Ван Сяофэн, Пролетарский А.В., Неусыпин К.А. Комплексные инновационные разработки в инжиниринговом центре Авионика // Современные аспекты фундаментальных наук. Труды второго международного симпозиума. М., МГОУ, 2015. С. 150—154.
2. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978. 399 с.
3. Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Теория и практика эволюционного моделирования. М.: Физматлит, 2003. 432 с.
4. Лукьянова Н.В. Модульный метод моделирования с использованием разложения Винера // Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 9. С. 17—22.
5. Лукьянова Н.В., Кузнецов И.А. Идентификация нелинейных динамических систем на основе разложения функционалов методом Винера // Материалы конф. «Управление в морских и аэрокосмических системах» (УМАС-2014). СПб., 2014.
6. Лукьянова Н.В., Пью Си Тху. Выбор метода идентификации для комплекса полунатурного моделирования // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 6. С. 32—37.
7. Пью Си Тху, Цибизова Т.Ю. Использование алгоритмов идентификации для полунатурного моделирования // Десятая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения». М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. С. 597—600.
8. Цибизова Т.Ю. Идентификация нелинейных систем автоматического управления при помощи фильтров Вольтерра // Фундаментальные исследования. 2015. № 2 (ч. 14). С. 3070—3074.
9. Wang L.Y. Persistent identification of time-varying systems // IEEE Trans. Autom. Control. 1997. Vol. 42. No. 1. P. 66—82.
10. Лукьянова Н.В., Мешков Н.А., Колупаев Р.В. Исследование систем управления: идентификация, моделирование, прогнозирование: учеб. пособие / под общ. ред. К.А. Неусыпина. М., ИИУ МГОУ, 2015. 110 с.
11. Ивахненко А.Г., Мюллер Й.Я. Самоорганизация прогнозирующих моделей. Киев: Техника, 1985. 362 с.
12. Неусыпин К.А., Вайс Ю.Л. Модификация нейронной сети Вольтерра методом самоорганизации // Автоматизация и современные технологии. 2007. № 1. С. 30—34.
13. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы: учебно-метод. пособие / под ред. Ю.Ю. Тарасевича. Астрахань: ИД «Астраханский университет», 2007. 87 с.

Ссылка для цитирования

Лукьянова Н.В., Полякова А.А. Модульный метод полунатурного моделирования системы самонаведения // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 11. С. 504—508.

Уважаемые авторы и читатели!

Редакция и редакционная коллегия сообщают:
межотраслевой научно-технический журнал «Автоматизация. Современные технологии»
успешно прошёл аккредитацию в ВАК при Минобрнауки России
для публикации работ соискателей учёных степеней по отрасли науки:

05.00.00 — технические науки

и четырём группам специальностей:

05.02.00 — машиностроение и машиноведение;

05.07.00 — авиационная и ракетно-космическая техника;

05.11.00 — приборостроение, метрология

и информационно-измерительные приборы и системы;

05.13.00 — информатика, вычислительная техника и управление.

Напоминаем: статьи следует подавать в редакцию заблаговременно!

С правилами оформления статей можно ознакомиться на сайте mashin.ru.

УДК 621.0

В.А. Елисеев, д-р техн. наук, проф.

(Институт инновационно-технологического менеджмента, г. Москва)

dr.ye@mail.ru

АСПЕКТЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ

Проведён анализ аспектов современной миссии отечественного государственного управления организацией в оборонно-промышленном комплексе перспективных производств, ведущих к спецификации развития высоких технологий. Изложены особенности наукоёмких/высокотехнологичных производств и технологических сдвигов, роль оборонно-промышленного комплекса в организации производства продукции, система стратегического планирования промышленно-технологического развития. Исследование опирается на общенаучный метод (постановка проблемы, информационно-аналитические обобщения, классификация и аналогии, анализ и синтез, индуктивно-дедуктивный подход).

Ключевые слова: технологическое развитие; организация производства; государственное управление; стратегическое планирование.

The analysis of the modern mission aspects of the national state control for the promising industry organization in the military-industrial complex leading to the specification of the high technologies development is carried out. The features of science-intensive/high-tech industries and technological shifts, the role of the military-industrial complex in the organization of product manufacturing, the system of strategic planning of industrial and technological development are described. The research is based on a general scientific method (problem statement, information and analytical generalizations, classification and analogies, analysis and synthesis, inductive-deductive approach).

Keywords: technological development; organization of production; state administration; strategic planning.

Введение. Оценка эффективности государственного управления национальной/мировой конкурентоспособностью стран осуществляется по индексу её глобальной конкурентоспособности, который учитывает многие показатели (технологический уровень, объём рынка, макроэкономическую стабильность, развитость финансового рынка, инновационный потенциал и др.). Что касается управления технологическим развитием Российской Федерации, то оно, конечно, направлено связано с высокими технологиями, наукоёмким производством, организационной эффективностью. Подразумевая под аспектами этого управления особенности адекватного соответствия вызовам в технологическом противостоянии с Западом (без разграничения с воспроизводством — его простой, расширенной и суженой моделями), представляется важным отобразить современную миссию управления технологически перспективными производствами в оборонно-промышленном (военно-промышленном) комплексе (ОПК), провести некий производственно-технологический «аудит» с учётом конверсии (механизма перестройки производственных связей и социально-экономических отношений, распределения и потребления используемой на военные цели части валового продукта, перехода организаций/предприятий ОПК на производство гражданской техники) и того

факта, что мировая экономика уже вступила в постиндустриальную эру — эру интеллектуальной экономики, основанной на инновациях и наукоёмкой продукции. Модернизация Вооружённых сил России как аргумент в удержании потенциального противника — процесс непрерывный, поэтому научные достижения, научно-технический и технологический потенциал — определяющие предпосылки обеспечения национальной безопасности и повышения конкурентоспособности. В переходе на инновационный путь развития страны решающая роль принадлежит именно ОПК — наиболее качественному, высокотехнологичному многопрофильному сектору экономики (не только производственному сектору системы вооружения), продукция и технологии которого широко используются во многих отраслях военного, двойного и гражданского назначения. ОПК производит значительную часть гражданской продукции, его интеграция с гражданскими отраслями промышленности во многом определяет темпы научно-технического прогресса, является основой формирования технологической базы развития наукоёмкой и конкурентоспособной продукции, решения основных задач реальной экономики. Кроме реконструкции и технического перевооружения производственно-технологической базы, миссия ОПК всё более основывается на феномене «знание—

ресурс», на эпистемологическо-гносеологических перформативности (самоочевидной востребованности) знания и научно-технической информации, на практической ориентации науки с превращением её в технонауку, т. е. для современного отечественного развития высоких технологий характерны безусловность и расширение привлечения фундаментальных исследований для эффективного решения прикладных проблем ОПК, которые, предшествуя процессам валидации и верификации продукции, изначально ведут к специфицированию перспектив производственно-технологического развития (оборонной и гражданской направленности — двойных технологий).

Цель статьи — анализ аспектов современной миссии отечественного государственного управления организацией в ОПК перспективных производств, ведущих к специфицированию развития высоких технологий, а именно, особенностей наукоёмких/высокотехнологичных производств, промышленного производства и технологических сдвигов, стратегического планирования промышленно-технологического развития.

Особенности наукоёмких/высокотехнологичных производств. Наукоёмкий сектор — часть экономической системы, которая включает отрасли, производящие продукцию и осуществляющие выполнение работ/предоставление услуг с использованием достижений науки и техники. Масштабы этого сектора, его влияние на развитие других отраслей экономики характеризуют экономический и научно-технический потенциал государства, определяют его развитие, конкурентоспособность и национальную безопасность, а также имеют характерные особенности развития наукоёмких/высокотехнологичных производств (в том числе в рамках ОПК) [1—6].

Примером уровня современного развития является ежегодный список прорывных технологий (инновационных технологий «топ-10») 2020 г., которые способны кардинально изменить жизнь (утверждается, что даже развитие человечества). Этот список (с разнящимися сведениями в источниках [7—9]) сформирован в результате соответствующего исследования экспертами портала «Technology Review» (Массачусетский технологический институт, Кембридж, США).

Судя, во-первых, по ежегодным рейтингам The Global Innovation Index [Глобальный индекс инноваций — международные аналитические доклады Международной бизнес-школы (INSEAD, Франция), Корнеллского университета (Cornell University, США) и World

Intellectual Property Organization (Всемирная организация по интеллектуальной собственности ООН, Швейцария), в которых оцениваются развитие, инновационность и технологичность стран мира с публикацией пресс-конференций в штаб-квартире ООН, Швейцария], во-вторых, по данным Technology Achievement Index — ТАИ [Индекс технологических достижений, предложенный Программой развития ООН (США, Нью-Йорк) и показывающий успехи стран в создании и распространении новых технологий, а также в формировании человеческих способностей и, в-третьих, по сведениям Bloomberg Business News (Деловые новости Блумберга, США, Нью-Йорк), Россия далека от высоких мест [10—12], а страны-лидеры — это нашедшие способы поддержки наукоёмких производств представители американской, европейской и азиатской моделей, они же — хозяева рынка наукоёмкой продукции (рис. 1).

Конечно, в отмеченные рейтинги, данные и сведения не вошли достижения России в оборонной сфере для внутреннего потребления, не учтена и поэтому отсутствует основная информация о наукоёмких/высокотехнологичных производствах ОПК. Однако в свете изложенного для макроэкономического развития нашей страны на пути к повышению её глобальной конкурентоспособности первоочередными задачами представляются: направленный подход, достижение значительных результатов в реализации импортозамещения, сотрудничество со странами-лидерами, освоение сфер мирового рынка.

Промышленное производство и технологические сдвиги. Новые промышленные технологии, обеспечивая рост производства и занятости, оказывают поддержку национальной инфраструктуре и обороноспособности, особенно когда при этом измерение технической эффек-

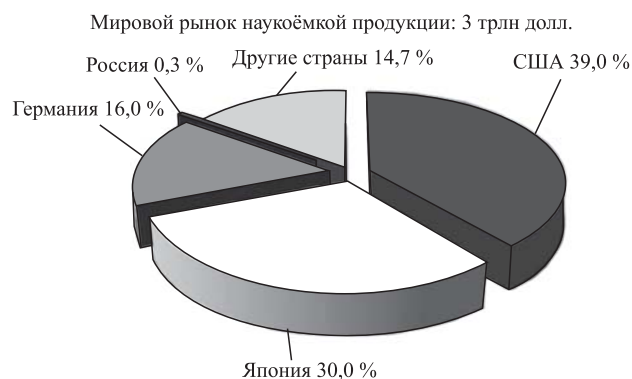


Рис. 1. Объём мирового рынка наукоёмкой продукции и доли стран

тивности или технического уровня базируется на параметрах, представляющих наибольшую потребительскую ценность, а не связанных с чисто техническими достижениями [1—3, 13].

Взаимосвязь между повышением результата (технического уровня, производительности) при связанных со временем затраченных ресурсах (с ориентацией на наибольшую потребительскую ценность для потенциальных заказчиков или потребителей) графически описывается динамикой технологических сдвигов, S-образными кривыми — технологической траекторией (рис. 2).

Перманентность технологических сдвигов соответствует пониманию инновационного и технологического развития как нестационарного и неравномерного процесса, а отказ от предыдущего жизненного цикла технологии — как условие дальнейшего развития производства.

Логистический характер технологической траектории свидетельствует о нелинейном характере соотношения между затратами и результатами в сфере НИОКР (прямопропорциональная зависимость характерна для ограниченного периода траектории). С учётом рыночного спроса (ёмкости, потенциала рынка), себестоимости продукции (работ, услуг) и в условиях конкуренции установление собственной позиции организации/предприятия на технологической траектории и сопоставление её с позициями конкурентов превращается в средство формирования стратегии, в инструменты прогнозирования конкурентных отношений. Кроме того, с использованием технологической траектории возможно адаптивно интерпретировать инновационные процессы от прерывных (вызванных сменой «продуктовой платформы») до революционных (необходимо

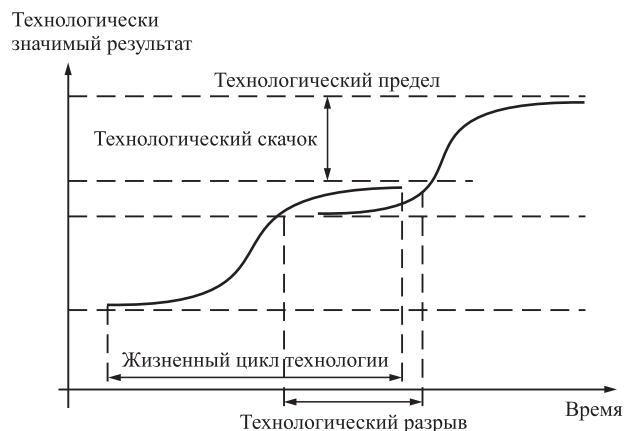


Рис. 2. Ключевые понятия динамики технологических сдвигов на примере временных границ, значимых результатов и двух отражающих процесс развития технологий-субститутов S-образных кривых (технологических траекторий)

вовремя распознать технологический разрыв и переориентировать инвестиции с разработки одной технологии на другую).

В ОПК промышленному производству (с соответствующей границей производственных возможностей) и технологическим сдвигам (включая развитие высоких технологий) характерны тенденции и специфика, обусловленные перспективами оборонной направленности, а гражданской — попутно. Отвечающие этим перспективам требования, во-первых, «размывают» классическую динамику технологических сдвигов, которая в «чистом виде» свойственна производству гражданской продукции в условиях рыночных отношений (см. рис. 2), а во-вторых, в рамках ограниченных ресурсов особенно зависят от организационно-функциональной направленности ОПК (табл. 1).

Таблица 1

Организационно-функциональная направленность ОПК

№ п/п	Функциональная направленность	Организационные атрибуты
1	Организационная основа	Регулирующая основа функционирования ОПК — Закон об обороне [14] и Перечень стратегических предприятий и акционерных обществ [15]
2	Обеспечение обороны, национальной безопасности и интересов, предотвращение опасности вовлечения в большую войну, зарубежные поставки продукции в рамках военно-технического сотрудничества	Регулирование ГОЗ установлено основополагающим законом [16, 17]. Военная безопасность поддерживается в рамках коридора пороговых значений в отношении стратегических сил сдерживания. Проблемы экономического обеспечения оборонной безопасности решаются в комплексе и взаимосвязи с экономическим обеспечением других видов безопасности. Интеграция в рыночную экономику связана с разработкой и внедрением технологий двойного применения, интегрированными процессами в военной и гражданской экономике. Организационные (вертикально-интегрированные, холдинговые, корпоративные) структуры (госкорпорации) позволяют снизить себестоимость продукции, увеличить доходы, сформировать механизмы эффективного использования прибыли на инвестиции в разработки нового поколения военной и гражданской техники, модернизировать производственный аппарат и осваивать новые экспортные рынки. Россия получает возможность участвовать в разделе мирового рынка высокотехнологичной продукции, в том числе военной, в рамках транснациональных компаний/корпораций

Продолжение табл. 1

№ п/п	Функциональная направленность	Организационные атрибуты
3	Ключевые направления развития ОПК [18]	<p>1. Техническое перевооружение для обеспечения выполнения Государственной программы вооружения (ГПВ — программы закупок и разработки боевой техники) и ГОЗ — импортозамещения и поэтапной локализации производств в интересах нацобороны и госбезопасности.</p> <p>2. Нарращивание научно-технического задела, определяющего технологическое превосходство по всем видам вооружений и военной техники.</p> <p>3. Осуществление масштабной модернизации ОПК, реализация инвестиционных проектов в организациях/предприятиях ОПК в рамках госпрограмм.</p> <p>4. Развитие кадрового потенциала ОПК, развитие системы многоуровневого образования и улучшение жилищных условий работников оборонной промышленности.</p> <p>5. Структурный пересмотр системы управления ОПК, становление интегрированных структур, контролируемых более 80 % выпуска военной продукции. Структуры должны стать ключевым элементом при переводе оборонной промышленности на систему организаций/предприятий полного жизненного цикла</p>
4	Проблемы ОПК	<p>1) Утрата базы электронного машиностроения;</p> <p>2) потеря научно-технологической базы;</p> <p>3) переход страны на рыночные отношения в ОПК не создал рыночные механизмы ценообразования;</p> <p>4) взаимная координация работ, проводимых в ОПК [19];</p> <p>5) увязка целей госпрограммы развития ОПК [20—22] с обеспечением реализуемости ГПВ до 2020 г. [19] (Президент Российской Федерации уже утвердил ГПВ на период 2018—2027 гг. [23], которая накладывается на предыдущую и имеет существенные особенности);</p> <p>6) несовершенство системы принятия решений о направлениях финансирования НИОКТР;</p> <p>7) несовершенство инфраструктуры национальной инновационной системы;</p> <p>8) низкая производительность и эффективность процессов (из-за недофинансирования в сочетании с устаревшими, не соответствующими требованиям современного рынка производственно-технологической базой, бизнес-моделями, операционными моделями; из-за низкого уровня развития рыночных компетенций у многих организаций/предприятий; из-за недостаточной эффективности вывода и продвижения продукции на рынок) [19]</p>
5	Специфика ОПК [4]	<p>Монополия заказчика (основной заказчик — государство), особые требования к качеству и техническим характеристикам военной продукции, её высокой наукоёмкости и технологичности, долгосрочность и капиталоемкость инвестиционных проектов. Необходимость поддержания мобилизационных мощностей, запасов стратегического сырья и материалов. Особенности специализации, кооперирования и информации (секретность), порождающие пирамидальные взаимосвязи производителей, дублирование производств и научных исследований, ограничения в передаче технологий. Сложности выхода организаций/предприятий на внешние рынки вооружений. Организации/предприятия отличаются крупными размерами; многие из них — градообразующие, обеспечивающие объекты социальной инфраструктуры. Особые требования предъявляются к качеству продукции; обязательно наличие избыточных (мобилизационных) производств и мощностей. Критерий выделения военного производства в составе ОПК и всего общественного производства — фактическое использование созданной продукции/услуг независимо от их натуральной формы, формы собственности и ведомственной принадлежности организаций/предприятий</p>
6	Задачи организаций и предприятий ОПК, обусловленность качества оборонных технологий	<p>Повышение эффективности функционирования для выпуска качественной высокотехнологичной продукции; ускорение и повышение гибкости производственных процессов; увеличение объёмов выпуска продукции; модернизация используемой техники и технологий; внедрение энергоэффективных решений; увеличение надёжности и конкурентоспособности выпускаемой продукции [24]. Направленность многопрофильной деятельности на создание: технологий для разработки и производства ВВСТ, продукции военного назначения для Вооружённых Сил, других войск, воинских формирований и органов; экспортной продукции военного назначения, продукции гражданского назначения, поставляемой на внутренний рынок; высокотехнологичной продукции гражданского назначения, поставляемой на внутренний и внешний рынки. Качество оборонных технологий связано с миссией госуправления (включая оргструктуру управления и управление программами развития) и с производственной функцией, ведущей к специфичированию развития технологий (особенно высоких) при корреляции количества продукции (объёма выпуска) с факторами производства (затраты ресурсов, уровень технологий, отдача от масштаба производства)</p>

Окончание табл. 1

№ п/п	Функциональная направленность	Организационные атрибуты
7	Структура ОПК	Различие экономической, территориальной и отраслевой структур характеризуется ростом долей частной и смешанной форм собственности, различием в военно-экономической эффективности, мобильности и готовности. Территориальная структура определяется размещением производительных сил. Отраслевая структура усложняется в зависимости от военных потребностей и видов производства, в связи с чем актуализируется проблема оптимизации [4]: организации/предприятия имеют различные организационно-правовые формы и формы собственности [унитарные госпредприятия, акционерные общества с участием государства, акционерные общества без его участия, вертикально-интегрированные, холдинговые организационные структуры — госкорпорации (см. п. 2 таблицы)]. Способствуя концентрации ресурсов, повышению возможностей по созданию конкурентных преимуществ на международной арене, они закрепляют своё монопольное положение — кооперативное единство на основе корпоративных интересов, которое ведёт к ограничению выбора партнёров, промышленных связей. Перечень организаций, включенных в реестр организаций ОПК, представляет отраслевую структуру реестра и структуру по отраслям ОПК [25, 26]
8	Государственная программа развития ОПК [20—22]	<p><i>Задачи Программы:</i> стимулирование развития ОПК на основе обеспечения развития и использования современных компьютерных технологий; продвижение продукции военного назначения на мировые рынки вооружений; создание условий для диверсификации и развития производства высокотехнологичной продукции военного, гражданского и двойного назначения; обеспечение финансово-экономической устойчивости и развития кадрового потенциала организаций ОПК.</p> <p><i>Ожидаемые результаты реализации Программы:</i> повышение конкурентоспособности продукции ОПК на внутреннем и внешнем рынках, рост объёмов промпроизводства продукции (в соответствии с отмеченными показателями).</p> <p><i>Ключевая составляющая Программы</i> — подпрограмма «Стимулирование развития ОПК» с мероприятиями промдеятельности (включая развитие производства продукции гражданского и двойного назначения с субсидиями и поддержкой экспорта), господдержки для обеспечения финансово-экономической устойчивости, развития кадрового потенциала, создания и применения суперкомпьютерных технологий (с возмещением затрат в интересах ВВСТ)</p>
9	Поисковые и прикладные исследования (в рамках программ, направленных на совершенствование научно-технической и технологической базы для разработки и производства ВВСТ)	<p><i>Поисковые исследования</i> — исследования, направленные на разработку и экспериментальную проверку путей, методов, технических решений использования новых научных знаний в интересах создания перспективных видов ВВСТ. Основные типовые результаты поисковых исследований: новые принципы создания вооружения и технологий, материалов с принципиально новыми свойствами, новых химических соединений, методов анализа, синтеза и моделирования.</p> <p><i>Прикладные исследования</i> — исследования, направленные преимущественно на применение новых знаний для достижения практических целей и решения конкретных задач</p>
10	Меры, способные повлиять на производительность труда в организациях и предприятиях ОПК [27]	Создание центра компетенций в области повышения экономической эффективности и результативности, в который войдут исключительно «гражданские» специалисты. Ориентация на повышение открытости деятельности в части их экономического и устойчивого развития. Введение ключевых показателей эффективности деятельности руководителей. Построение целостной системы документов стратегического и операционного управления, разработка и экспертное обсуждение стратегий долгосрочного развития на уровне интегрированных структур с учётом повышения эффективности их деятельности. Создание условий для диверсификации выпускаемой продукции, конверсии производства
11	Научно-технический задел [13]	<p><i>Основные элементы:</i> заделы научный, научно-технологический и производственно-технологический, включающие новые/усовершенствованные материалы и соединения; элементную базу, составные части, модули и блоки, алгоритмы и программы для вычислительной техники, лабораторное и испытательное оборудование, экспериментальные и макетные образцы нетрадиционных видов техники, технические задания на НИОКТР; концептуальные, нормативно-технические и методические документы. Формируется в рамках фундаментальных и поисковых исследований, проводимых в интересах обеспечения обороны страны и её безопасности. Содержание исследований устанавливается Перечнем приоритетных направлений фундаментальных, прогнозных и поисковых исследований, который определён документами, утверждёнными на высшем государственном уровне. Научно-технические достижения в результате этих работ обеспечивают развитие военных технологий и играют важную роль на всех стадиях жизненного цикла ВВСТ, в формах и способах их боевого применения</p>

Кроме отмеченной в табл. 1 государственной программы развития ОПК [20—22], в ОПК реализуются программы развития авиационной промышленности, судостроения и техники для освоения шельфовых месторождений, электронной и радиоэлектронной, а также ракетно-космической и атомной промышленности [28—33].

Стратегическое планирование промышленно-технологического развития. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации [34] отражает национальные интересы на долгосрочную перспективу, которые реализуются через стратегические национальные приоритеты (национальная оборона, государственная и общественная безопасность) и приоритеты устойчивого развития; стратегия содержит организационные, нормативные правовые и информационные основы, а также основные характеристики состояния национальной безопасности (рис. 3). На непрерывные процессы развития в сфере ОПК параллельно влияют не только угрозы национальной безопасности и безопасности самого

ОПК (п. 3 табл. 2), но и формирование многополярной системы мира (вместо бывшей bipolarной), и движущие силы глобализации мировой экономики (см. пп. 4 и 5 табл. 2) — глобализация производительных сил и рост масштабов международной миграции рабочей силы, углубление интернационализации (капитала, производства и обмена), формирование глобальной инфраструктуры, рост интернационализации воздействия производства и потребления на окружающую среду.

Организационно-распорядительные методы управления являются реагированием на вызовы потенциальных противников в виде оперативного внедрения прорывных идей — ключевого элемента оборонного научно-технического задела для создания перспективного вооружения. При этом, что касается производственно-ориентированных функций и их основных составляющих, то они определяются не только возникающими проблемами и задачами, но и позицией и возможностями ОПК в их решении, в любом случае связанными с направленностью научно-технических раз-

работок (включая технологические) и эффективностью использования приобретённого потенциала, с возрастанием роли управления (институционального, управленческого и технического). Основным механизмам управления ОПК, кроме организационного, не могут быть не свойственны экономический (под экономической эффективностью производства понимается результативность деятельности организации/предприятия — соотношение между экономическими результатами и затратами/ресурсами) и социально-психологический факторы.

Влияние ОПК на экономику страны двояко и может быть оценено с использованием средств оптимизации; с одной стороны, увеличение расходов ОПК связано с отвлечением ресурсов на производство военной (негражданской) продукции, но с другой, — эти расходы демонстрируют переход на инновационный путь развития, стимулируют становление многих отраслей и секторов, способствуют научно-техническому прогрессу, повышают занятость, активизируют совокупный спрос, превращают производителей вооружений в «системных интеграторов», привлека-

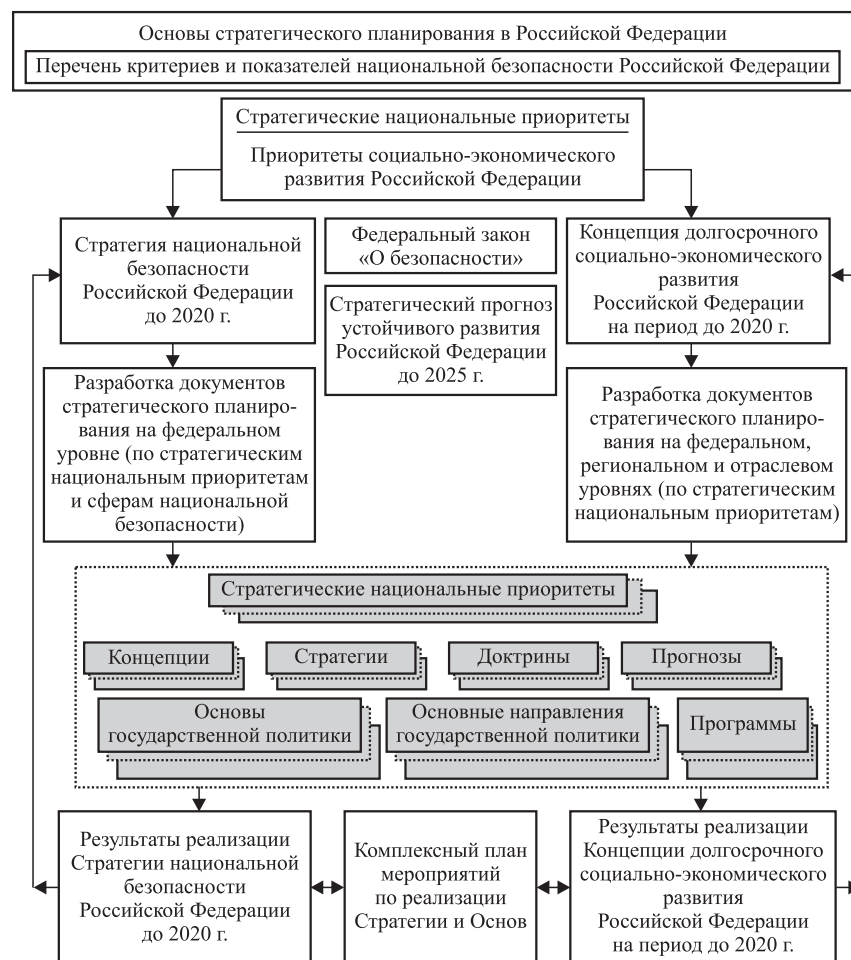


Рис. 3. Система документов стратегического планирования обеспечения национальной безопасности Российской Федерации

Таблица 2

Специфика организации перспективных исследований и производств в ОПК [4, 13, 19—22, 34, 38—40]

№ п/п	Термин	Трактовка/комментарий
1	Система приоритетов	<i>Стратегические национальные приоритеты</i> — направления обеспечения нацбезопасности, по которым реализуются конституционные права и свободы граждан, осуществляется устойчивое социально-экономическое развитие и охрана суверенитета страны, её независимости и территориальной целостности. Система приоритетов Российской Федерации связана межгосударственными, государственными, федеральными, региональными и ведомственными целевыми программами с приоритетами отраслевого развития (перечень конкурентоспособных и стратегически значимых отраслей, перечень критических технологий), приоритетами регионального развития (межрегиональных производственно-территориальных комплексов), с приоритетами концентрации долгосрочного социально-экономического развития
2	Организационное управление	Осуществляемая наделённой полномочиями и ответственностью структурой/персоналом деятельность, обеспечивающая эффективность управления, продукт которого — решения и практические действия, необходимые для функционирования ОПК в требуемом режиме
3	Внутренние угрозы безопасности ОПК	Сокращение инвестиций, негативное влияние госдолга, «бегство» капитала за рубеж, утрата рынков сбыта ВВСТ, разрушение научно-технического потенциала, снижение уровня технологической оснащённости производства, уменьшение инновационной активности, утечка «умов» за границу
4	Влияние движущих сил глобализации мировой экономики	Обострение конкуренции с крупными компаниями (прежде всего США); снижение совокупного спроса на ВВСТ вследствие сокращений оборонных бюджетов; относительный рост спроса на результаты НИОКТР для создания высокотехнологичных систем вооружений; подготовка к ведению коалиционных войн в рамках военных доктрин большинства развитых стран; неадекватность структуры большинства оборонных отраслей новым задачам и требованиям, излишек устаревших мощностей, усиливающаяся неэффективность их дальнейшего использования; массовое осуществление программ по оптимизации бюджетных расходов для максимизации отдачи от вложенных средств; усиление ориентации промышленности на фондовый рынок в интересах максимизации акционерной прибыли в связи с расширением участия частного капитала в ОПК. Кроме того, в условиях глобализации (в рамках ВТО) возникла необходимость господдержки субъектов рынка; поэтому, основываясь на опыте торговых споров внутри ВТО, ОПК, во-первых, обязан учитывать запреты на косвенное субсидирование гражданской продукции за счёт военных заказов («двойных технологий»), а во-вторых, программы реструктуризации диверсифицируемых организаций/предприятий вынуждены принимать во внимание ограничения международных соглашений (в том числе ВТО)
5	Составляющие глобализации (перераспределение ресурсов в мировой экономике)	Распространение научно-технических достижений, интернационализация производства и капитала, трансфер технологий и движение трудовых ресурсов. Привлечение капитала в наукоёмкие отрасли, связанное, во-первых, с рентабельностью производств (которая, зависит от уровня отраслевой производительности труда), а во-вторых, с увеличением количества организаций/предприятий в наукоёмком секторе, которые создают преимущества для себя (по оплате труда сотрудников, перспективам выхода на мировые рынки и т. п.) и для интенсификации развития сектора. Формирование и совершенствование рынка технологий. Взаимообмен научно-техническими знаниями и технологиями (трансфер) с зарубежными странами
6	ГОЗ как инструмент госрегулирования ОПК	Для обеспечения обороны и безопасности Российской Федерации, а также поставок продукции в области военно-технического сотрудничества с зарубежными странами Правительством Российской Федерации (см. п. 2 табл. 1) определён порядок формирования, размещения, финансирования и исполнения ГОЗ и регулируются правовые и финансовые отношения в этой сфере. Госзаказчиком ВВСТ, НИОКТР по их разработке, созданию новых технологий производства ВВСТ может быть только федеральный орган исполнительной власти, имеющий в своём составе войска и вооружённые формирования. ГОЗ размещается на конкурсной основе; госзаказчик заключает контракт с головным исполнителем — победителем конкурса. ГОЗ обязателен для всех организаций, если его размещение не влечёт за собой убытков, связанных с выполнением. Проект ГОЗ разрабатывается при формировании федерального бюджета на очередной год с учётом ресурсных возможностей экономики страны. Основные его показатели утверждаются Президентом Российской Федерации. ГОЗ формируется в пределах, устанавливаемых федеральным бюджетом, на основе: положений военной доктрины Российской Федерации; федеральной программы разработки, создания и производства ВВСТ на долгосрочную, среднесрочную и краткосрочные перспективы (включающей в себя заказы на НИОКТР, серийное производство, утилизацию и уничтожение выводимых из эксплуатации ВВСТ, капитальное строительство, а также мероприятия по материально-техническому обеспечению этих работ); мобилизационного плана экономики Российской Федерации; программ военно-технического сотрудничества Российской Федерации с иностранными государствами и др. ГОЗ служит, в частности, инструментом проведения военно-технической политики государства.

Окончание табл. 2

№ п/п	Термин	Трактовка/комментарий
		За счёт федерального бюджета законодательно предусматривается выделение организациям/предприятиям ОПК ассигнований на строительство и реконструкцию, оснащение современным оборудованием, освоение новой техники, технологий и материалов. Предусматривается также фиксированный уровень рентабельности по видам оборонной продукции, ежеквартальная индексация ассигнований в связи с инфляцией, поквартальное или поэтапное бюджетное авансирование, освобождение головного исполнителя ГОЗ от таможенных пошлин на оборудование и другую продукцию. Эти и аналогичные меры направлены на поддержание в ОПК передовых высоких технологий. В свою очередь ОПК позволяет заказывать через ГОЗ и создавать новейшие системы оружия, не уступающие или превосходящие зарубежные аналоги, что необходимо для обеспечения нацбезопасности. Значимость ГОЗ усиливается с применением маркетинговых стратегий, совершенствованием управления, развитием системы страхования, повышением эффективности контроля за использованием бюджетных средств. Наряду с проблемой качества (квалификации, ответственности) «Исполнителя» в лице ОПК стоит проблема качества «Заказчика» ГОЗ, отсутствие развитого институционального механизма ГОЗ и ценообразования, с одной стороны, и отсутствие видения будущих военных действий и необходимых для них ВВСТ со стороны «Заказчика» — с другой
7	Перечень базовых и критических военных технологий для создания перспективных видов ВВСТ	Основной нормативный документ, определяющий приоритетные направления создания научно-технического задела (см. п. 11 табл. 1) для перспективного и нетрадиционного вооружения. Обеспечивает решение основных задач, стоящих перед Минобороны России: формирование технологической программы реализации мероприятий ГПВ; обоснование ассигнований, необходимых на создание оборонных технологий; контроль выполнения программных мероприятий; трансфер и коммерциализация технологий прорывного характера
8	Особенности инновационной деятельности в ОПК	Совершенствование индикативной системы планирования и управления: программно-целевого планирования развития ВВСТ и системы программно-целевого планирования развития ОПК. К инвестиционному инструменту (федеральным адресным программам) добавились способствующие развитию инновационной деятельности через государственно-частное партнёрство: инвестиционные и венчурные фонды/компании, особые экономические зоны, технопарки и концессии. Законодательное установление порядка закрепления и передачи прав на результаты интеллектуальной деятельности, созданные в организациях/предприятиях за счёт средств федерального бюджета. Содействие Фонда перспективных исследований осуществлению научных исследований и разработок в интересах обороны страны и безопасности государства, связанных с высокой степенью риска достижения качественно новых результатов в военно-технической, технологической и социально-экономической сферах, разработки и создания инновационных технологий и производства высокотехнологичной продукции военного, специального и двойного назначения. Инвентаризация, учёт и оценка результатов интеллектуальной деятельности, полученных за счёт средств федерального бюджета; привлечение внебюджетных источников финансирования, что повышает конкурентоспособность продукции на мировом рынке; внедрение технологий информационной поддержки
10	Фундаментальные исследования в рамках ГПВ	Исследования, направленные на изучение свойств материи, явлений и законов природы, которые могут быть применены ОПК для совершенствования существующих и создания принципиально новых систем ВВСТ
11	Военный экспорт и офсетная практика	Экспортные заказы позволяют организациям/предприятиям ОПК функционировать в условиях снижения ассигнований... Важную роль играет офсетная практика с её возможностями для покупателя совместить приобретение вооружений и военной техники с удовлетворением потребностей в гражданской сфере. В рамках офсетных соглашений могут реализовываться компенсационные товарные сделки-трансферы: работы по обслуживанию и ремонту, производство комплектующих, коммерческие, управленческие и образовательные услуги в сфере технологий и производства гражданского и военного назначения, инвестиций в экономику страны-импортёра и т. п. Офсетная практика — инструмент конкуренции на мировом рынке оружия, повышающий шансы страны-производителя в ценовой конкуренции

ющих аутсорсеров из круга гражданских производителей. Или иначе, затраты должны быть минимально необходимыми для обороноспособности страны и максимально возможными, исходя из реального финансово-экономического положения Российской Федерации.

Так как в отличие от свободного рынка принципы и практика государственного

управления основываются на системе отношений с регуляторными барьерами (включая реструктуризацию ОПК), то результативность ОПК, выраженная в динамике показателей промышленного производства и обеспечивающих его факторов (экономических ресурсов), прямо зависит от надсистемы организационного управления (ситуационно-интегрирован-

ного государственно-стратегического планирования), которая фактически устанавливает управляющие действия и организующие подходы — государство на основании действующей концептуальной и нормативно-правовой базы (см. рис. 3) выступает одновременно в роли заказчика и потребителя: относящееся к промышленности и технологиям военно-техническое и оборонное планирование определяется сформулированными в квантифицируемой (измеримой) форме ключевыми решениями и документами Правительства Российской Федерации, касающимися выполнения Государственной программы вооружения (ГПВ) и Государственного оборонного заказа (ГОЗ), программ развития оборонной, атомной и ракетно-космической промышленности, а также имеющих отношение к международному военно-техническому сотрудничеству и развитию научно-исследовательской деятельности [35].

В условиях глобального военно-технического противостояния с потенциальным противником и западных экономических санкций практически неизбежна концентрация отечественных ресурсов в ОПК под эгидой ответной стратегии технологического опережения конкурентов и исторически сложившихся организационных средств оборонно-промышленных патернализма и автаркии. Проявление в нашей экономике ведущей роли наукоёмких/высокотехнологичных производств ОПК связано с функциональным симбиозом организационно-распорядительных (организационно-административных) методов управления, традиционного развития научно-исследовательской деятельности и инновационной направленности производств, с практическими возможностями технологий двойного назначения, международным сотрудничеством и экспортом (зависящий от форс-мажорных обстоятельств импорт вооружений, как форма проявления внешнерыночных отношений, не составляет основу международных экономических отношений нашей страны).

Оборонно-промышленные патернализм и автаркия исключают партисипативность организационного управления и определяются комплексом документов производственно-ориентированного характера, которые направлены на реализацию функций государственного управления ОПК.

Здесь под патернализмом понимается система отношений, при которой госуправление обеспечивает оборонно-промышленные потребности страны, а страна подчинена формам и средствам развития ОПК. Под автаркией — экономический режим самообеспечения

страны с системой замкнутого производства и минимальной зависимостью от обмена с внешней средой. При этом патернализм и автаркия отражают агрегирование функций управления, направленность оборонно-промышленной перспективы, ограничение других (кроме установленных) производственных ориентаций, т. е. принципы и практика государственного управления в отличие от свободного рынка подразумевают наличие системы отношений с консолидацией и регуляторными барьерами.

Технология двойного назначения — технологический процесс (производственный, проектный, эксплуатационный и др.), применимый для производства военной и гражданской продукции. Для создания современных вооружений, военной и специальной техники (ВВСТ) (в том числе, новых поколений) и конкурентоспособной на внутреннем и внешнем рынках продукции технологическому развитию требуется привлечение дополнительных внебюджетных средств. То есть для повышения рентабельности производства оборонной продукции, ограниченного финансированием госзаказчика, необходимо расширение масштабов применения двойных технологий.

Развитие научно-исследовательской деятельности и инновационная направленность производств всегда были свойственны оборонной промышленности, а на современном этапе оснащения вооружённых сил особенно востребованы повышение эффективности и конкурентоспособности продукции ОПК, что требует реализации приоритетных направлений развития науки, технологий (включая критические) и техники Российской Федерации [36], ускорения производственно-технологического развития с регулярной реорганизацией наукоёмких производств, интеллектуализации основных факторов производства, формирования инновационной системы с информационно-экспертным обеспечением (в виде, пригодном для коммерциализации и с использованием инвестиционных инструментов с их достоинствами и недостатками, но без ущерба для госбезопасности). При осуществлении инновационной деятельности в ОПК основная роль принадлежит государству в разных сферах — инвестиционной, налоговой и амортизационной, ресурсной, информационной, структурной (институциональной), антимонопольной, экспортно-импортной и в выборе стратегии (наступательной, оборонительной, имитационной). Экономическая привлекательность инновационной системы ОПК связана с обретением бизнесом весомых предпочтений, поэтому для результативной инновационной де-

тельности кроме государственного стимулирования востребовано государственно-частное партнёрство (в том числе с аквизицией частных средств в инфраструктуре ОПК), также требующее государственного регулирования баланса оборонных и коммерческих интересов производителей продукции при осуществлении диверсификации, интегрирующей ОПК в экономику. Нестабильность в финансовых показателях и/или убыточность/малорентабельность организаций/предприятий ОПК могут быть связаны с зависимым положением от ГОЗ при ослабленных рыночных стимулах развития, что не приводит к пополнению бюджета, не становится стимулом к развитию НИОКТР. Повышению продуктивности коммерциализации способствуют такие рыночные механизмы, как технологические менеджмент (управление технологическими ресурсами), маркетинг (деятельность по удовлетворению рыночных потребностей) и трансфер (обмен).

Уровень исследований и связанных с ними технологий — фактор, определяющий развитие вооружения на долгосрочную перспективу. Фундаментальная наука России вносила и вносит свой неопределимый вклад в научно-исследовательские и инновационные достижения, хотя «возникает вопрос о способе/форме сближения фундаментальной науки с наукоёмким производством в реалиях отечественных технологических трансформаций, а значит, о современной и перспективной роли/месте РАН в системе «фундаментальная наука — наукоёмкое производство» [37].

Международное сотрудничество (межстрановое сотрудничество, международная кооперация) — организация (основанная на принципе распределения производства продукции, общей защиты инвестиций и промышленных ноу-хау, взаимной гарантии рисков методами управления — уклонением, локализацией, диссипацией и компенсацией) с участием зарубежных партнёров (например, через посредство ОАО «Рособоронэкспорт») совместного или взаимосогласованного производства. Сотрудничество способствует обмену технологиями и разделению издержек при разработке/освоении новых, хотя при совместных разработках оно критично к принадлежности интеллектуальной собственности.

Экспорт ОПК — продажа продукции (в основном ВВСТ) и услуг в другие страны, международная торговля, выполнение экспортных операций (контрактов) с правоприменением льгот производителя. С учётом транзакционных издержек экспорт является

фактическим индикатором реальной конкурентоспособности продукции.

Организационно-экономическим механизмом управления, рычагом влияния государства на экономику страны является система госзаказов, закупок продукции/товаров, работ и услуг для государственных нужд; деятельность госзаказчика регламентируется законами и нормативно-правовыми актами федеральной контрактной системы, а при принятии решений доминирует принцип коллективной ответственности. Вид госзакупки — закупки продукции и услуг военного назначения, осуществляемые посредством реализации ГОЗ (правового акта, предусматривающего поставку продукции для федеральных нужд). Объёмы ГОЗ определяют потребители продукции и услуг военного назначения — Вооружённые силы, а также другие войска, воинские формирования и органы, которые являются основными субъектами в формировании спроса на эту продукцию. При этом, как уже отмечалось, государство выступает одновременно в роли не только потребителя, но и заказчика: заказчик ГОЗ — федеральный орган исполнительной власти — осуществляет заказы на разработку, производство и поставку продукции, работ/услуг (в ГОЗ включены расходы на НИОКТР, закупку и ремонт ВВСТ в организациях/предприятиях ОПК, а также на спецстроительство), а финансирование ГОЗ осуществляется за счёт федерального бюджета посредством выделения Минфином России ассигнований заказчику (см. табл. 2).

Заключение. Анализ аспектов современной миссии отечественного государственного управления организацией в ОПК перспективных производств (ведущих к специфицированию развития высоких технологий) раскрывает особенности, во-первых, наукоёмких/высокотехнологичных производств, во-вторых, промышленных производств и технологических сдвигов, а в-третьих, стратегического планирования промышленно-технологического развития.

К особенностям наукоёмких/высокотехнологичных производств продукции военного, гражданского и двойного назначения/применения относятся показатели (с соответствующими детерминантами развития), в основном ориентированные на использование научно-технического и производственно-технологического потенциалов оборонных организаций/предприятий России для внутреннего потребления и поэтому не отражённые в международных рейтингах, данных и сведе-

ниях, в том числе в объёмах мирового рынка и долях стран наукоёмкой продукции.

Производственно-технологический «аудит» с учётом конверсии и того факта, что мировая экономика уже вступила в постиндустриальную эру (переход к интеллектуальной экономике, основанной на инновациях и наукоёмкой продукции), показывает, что для промышленности Российской Федерации характерна динамика технологических сдвигов, в которой существенно сказывается роль ОПК (ядра развития наукоёмких/высокотехнологичных производств страны) в установлении границ производственных возможностей, в поиске наиболее эффективных направлений разработок (или в отказе от тупиковых в предотвращённом ущербе).

В условиях глобального военно-технического противостояния неизбежна концентрация отечественных ресурсов в ОПК под эгидой ответного технологического опережения конкурентов организационными средствами патернализма и автаркии, когда промышленно-технологическое развитие основывается на системе стратегического планирования обеспечения национальной безопасности — функционального симбиоза организационно-распорядительных (организационно-административных) методов управления, учитывающих специфику перспективной научно-исследовательской и инновационной деятельности, практические возможности производственного применения технологий, международное сотрудничество и экспорт. Установление государственно-частного партнёрства (в том числе с аквизицией частных средств в инфраструктуре ОПК) при осуществлении диверсификации (интегрирующей ОПК в экономику) также требует госрегулирования баланса оборонных и коммерческих интересов производителей продукции.

Библиографические ссылки

1. **Жигляева А.В.** Наукоёмкие технологии: роль в современной экономике, проблемы и перспективы развития // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2017. Т. 39. С. 2721—2725. URL: <http://e-koncept.ru/2017/970871.htm> (дата обращения: 18.06.2020).
2. **Коноплицкий В.А., Филина А.И.** Экономический словарь. Толково-терминологический: справочное издание. Киев: КНТ, 2007. 624 с. Режим доступа: https://www.studmed.ru/konoplickiy-v-a-filina-a-i-ekonomicheskii-slovar-tolkovo-terminologicheskii_2f1b973d7b5.html (дата обращения: 18.06.2020).
3. **Поршнев А.Г.** Управление организацией: энциклопедический словарь / под ред. А.Г. Поршнева, А.Я. Кибанова, В.Н. Гунина. М.: ИНФРА-М, 2001. 822 с. Режим доступа: <https://znanium.com/catalog/product/435765> (дата обращения: 18.06.2020).

4. **Кузык Б.Н.** Оборонно-промышленный комплекс (ОПК) / Большая российская энциклопедия. Электронная версия (2017). Режим доступа: <https://bigenc.ru/text/5045275> (дата обращения: 18.06.2020).

5. **Оборонно-промышленный комплекс России.** Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Оборонно-промышленный_комплекс_России (дата обращения: 18.06.2020).

6. **Решение** для оборонно-промышленного комплекса. Режим доступа: <https://www.intertrust.ru/solutions/reshenie-dlya-oboronno-promyshlennogo-kompleksa/> (дата обращения: 18.06.2020).

7. **10 технологий**, которые потрясут мир — 2020 / Главные тренды по версии Массачусетского технологического института. Режим доступа: <https://wosoft.ru/news-163580-10-tehnologij-kotorye-potryasut-mir-2020-glavnye-trendy-po-versii-massachusettskogo-tehnologicheskogo.html> (дата обращения: 18.06.2020).

8. **Вести.** Наука — Топ-10 прорывных технологий 2020 г. Режим доступа: <https://www.facebook.com/Vesti.Nauka/posts/3122993431045503/> (дата обращения: 18.06.2020).

9. **10 прорывных технологий 2020 г.** (по сведениям делового журнала «Инвест-Форсайт»). Режим доступа: <https://www.if24.ru/10-progvnyh-tehnologij-2020/> (дата обращения: 18.06.2020).

10. **Руденко Д.Ю., Диденко Н.И.** Мировой опыт оценки уровня научно-технологического развития // Вестник Тюменского гос. ун-та. Социально-экономические и правовые исследования. 2016. Т. 2. № 4. С. 129—147. Режим доступа: https://vestnik.utmn.ru/upload/iblock/25f/129_147.pdf (дата обращения: 18.06.2020).

11. **Россия** в зеркале международных рейтингов: информ.-справ. изд. ИЭОПП СО РАН. Новосибирск: Параллель, 2019. 171 с. Режим доступа: http://lib.ieie.su/docs/2019/Russia_v_zerkale_mezhhdunar_reytingov.pdf (дата обращения: 18.06.2020).

12. **Глобальный индекс инноваций** / Гуманитарный портал ISSN 2310-1792. Режим доступа: <https://gtmarket.ru/ratings/global-innovation-index/info> (дата обращения: 18.06.2020).

13. **Военно-техническое** сопровождение исследований в России и США / Координационный совет разработчиков и производителей РЭА, ЭКБ и продукции машиностроения. Союз машиностроителей России. 10 с. Режим доступа: <https://soyuzmash.ru/docs/pre-z-prez-ksrpr-090916-2.pdf> (дата обращения: 18.06.2020).

14. **Федеральный закон** от 31 мая 1996 г. № 61-ФЗ «Об Обороне» (с изм. и доп.). Режим доступа: <https://base.garant.ru/135907/> (дата обращения: 18.06.2020).

15. **Указ** Президента Российской Федерации от 4 августа 2004 г. № 1009 «Об утверждении перечня стратегических предприятий и стратегических акционерных обществ» (с изм. и доп.). Режим доступа: <https://base.garant.ru/187281/> (дата обращения: 18.06.2020).

16. **Федеральный закон** от 29 декабря 2012 г. № 275-ФЗ «О государственном оборонном заказе» (ред. от 18 февраля 2020 г., действует с 29 февраля 2020 г.). Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=355770> (дата обращения: 18.06.2020).

17. **Оборонный заказ России.** Режим доступа: http://lunnuu.ru/Gosoboronzakaz/Oboronnyj_zakaz.html (дата обращения: 18.06.2020).

18. **Денис** Мантуров обозначил 5 ключевых направлений развития ОПК. Режим доступа: https://vpk.name/news/134021_denis_manturov_oboznachil_5_klyuchevyih_napravlenii_razvitiya_opk.html (дата обращения: 18.06.2020);

<http://www.ruwings.ru/news/2015/06/17/142167> (дата обращения: 18.06.2020).

19. **Рахманов А.А.** 8 проблем российского оборонно-промышленного комплекса и пути их решения // Воздушно-космическая сфера. Вневедомственный экспертный совет по вопросам воздушно-космической сферы. № 2 (87). 2016. С. 106—111. Режим доступа: <https://www.vesvks.ru/vks/article/8-problem-rossiyskogo-oboronno-promyshlennogo-komp-16153> (дата обращения: 18.06.2020).

20. **Постановление** Правительства Российской Федерации от 16 мая 2016 г. № 425-8 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации "Развитие оборонно-промышленного комплекса"». Режим доступа: <http://government.ru/rugovclassifier/859/events/> (дата обращения: 18.06.2020).

21. **Постановление** Правительства Российской Федерации от 6 февраля 2019 г. № 85-6 «О внесении изменений в государственную программу Российской Федерации "Развитие оборонно-промышленного комплекса"». Режим доступа: http://minpromtorg.gov.ru/docs/#!postanovlenie_pravitelstva_rf_856_ot_06_fevralya_2019_goda (дата обращения: 18.06.2020); <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201902080012> (дата обращения: 18.06.2020).

22. **Постановление** Правительства Российской Федерации от 13 марта 2020 г. № 268-12 «О внесении изменений в государственную программу Российской Федерации "Развитие оборонно-промышленного комплекса"». Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202003190020> (дата обращения: 18.06.2020); <https://www.vesvks.ru/vks/article/8-problem-rossiyskogo-oboronno-promyshlennogo-komp-16153> (дата обращения: 18.06.2020).

23. **Ускорение** на гиперзвуке. Режим доступа: <https://rg.ru/2018/02/27/kakimi-vidami-oruzhiia-obespechit-armiiu-novaia-gosprogramma.html> (дата обращения: 18.06.2020).

24. **Решения** для оборонно-промышленного комплекса. Режим доступа: <https://www.2test.ru/solutions/otraslevye-resheniya/oboronno-promyshlennyy-kompleks-ork/> (дата обращения: 18.06.2020).

25. **Приказ** Минпромторга России от 20 ноября 2014 г. № 2338 «Об утверждении перечня организаций, включенных в сводный реестр организаций оборонно-промышленного комплекса». Режим доступа: http://minpromtorg.gov.ru/common/upload/files/docs/Prikaz_N_2338_ot20.11.2014.PDF (дата обращения: 18.06.2020).

26. **Кушнир К.А.** Анализ развития предприятий оборонно-промышленного комплекса России // Вестник Евразийской науки. 2018. № 4. Режим доступа: <https://esj.today/PDF/12ECVN418.pdf> (дата обращения: 18.06.2020).

27. **Коцюбинский В.А.** Оборонно-промышленный комплекс и производительность труда: домыслы и реальность. Режим доступа: <http://integral-russia.ru/2018/01/31/oboronno-promyshlennyy-kompleks-i-proizvoditelnost-truda-domysly-i-realnost/> (дата обращения: 18.06.2020).

28. **Постановление** Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г. № 303 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации "Развитие авиационной промышленности на 2013—2025 годы"». Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipro/prime/doc/70544068/> (дата обращения: 18.06.2020).

29. **Постановление** Правительства Российской Федерации от 31 марта 2017 г. № 374 «Об утверждении

госпрограммы "Развитие судостроения и техники для освоения шельфовых месторождений на 2013—2030 годы"». Режим доступа: <http://government.ru/rugovclassifier/845/events/> (дата обращения: 18.06.2020).

30. **Постановления** Правительства Российской Федерации от 17 февраля 2016 г. № 109 и 110 «Об утверждении госпрограммы "Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013—2025 годы"». Режим доступа: <http://government.ru/rugovclassifier/837/events/> (дата обращения: 18.06.2020).

31. **Распоряжение** Правительства Российской Федерации от 28 декабря 2012 г. № 2594-р «Об утверждении государственной программы Российской Федерации "Космическая деятельность России на 2013—2020 годы"». Режим доступа: <http://government.ru/docs/3364/> (дата обращения: 18.06.2020).

32. **Постановление** Правительства Российской Федерации от 23 марта 2016 г. № 230 «Об утверждении Федеральной космической программы России на 2016—2025 годы». Режим доступа: <https://www.goscocosmos.ru/22347/> (дата обращения: 18.06.2020).

33. **Постановление** Правительства Российской Федерации от 2 июня 2014 г. № 506-12 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации "Развитие атомного энергопромышленного комплекса"». Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/41d4e579a4d19542262a.pdf> (дата обращения: 18.06.2020).

34. **Указ** Президента Российской Федерации от 31 декабря 2015 г. № 683 «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации». Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/40391/page/1> (дата обращения: 18.06.2020).

35. **Оборонно-промышленный** комплекс. Государственный оборонный заказ. Режим доступа: <http://government.ru/rugovclassifier/37/events/> (дата обращения: 18.06.2020).

36. **Указ** Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 г. № 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации» (с изм. и доп.). Режим доступа: <https://base.garant.ru/55171684/> (дата обращения: 18.06.2020).

37. **Елисеев В.А.** Инновационные особенности современных технологических трансформаций // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 8. С. 362—376.

38. **Мураховский В.И., Ремизов М.В.** Проблемы импорта вооружений в РФ: анализ эффективности закупок, международная кооперация и трансферт технологий в оборонно-промышленном комплексе // Арсенал Отечества. 2013. № 1. Режим доступа: <https://arsenal-otechestva.ru/analytic/169-problemy-importa-vooruzhenij-v-rf> (дата обращения: 18.06.2020).

39. **Косенко А.А., Топорова Ю.М.** Активизация инновационной деятельности в оборонно-промышленном комплексе // Вооружение и экономика. 2009. № 4 (8). С. 14—28. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15123738> (дата обращения: 18.06.2020).

40. **Федеральный закон** от 16 октября 2012 г. № 174-ФЗ «О Фонде перспективных исследований». Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/36169> (дата обращения: 18.06.2020).

Ссылка для цитирования

Елисеев В.А. Аспекты организации производственно-технологического развития // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 11. С. 509—520.



УДК 62-503.56; 681.5.015.24

А.А. Колодин

(Иркутский национальный исследовательский технический университет)

kolodin@istu.edu

УПРАВЛЕНИЕ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ МОДЕЛИ В СИСТЕМАХ ЛОКАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Раскрыт принцип управления на основе прогнозирующей модели (model predictive control), как один из перспективных способов управления. Приведены теоретические аспекты реализации данного подхода, его преимущества и недостатки. Описан алгоритм реализации данного подхода применительно к SISO-системе на примере идеальной модели второго порядка. Приведены результаты моделирования в сравнении с классическим ПИД-регулятором. Рассмотрено влияние ошибок моделирования на работу регулятора.

Ключевые слова: управление; прогнозирование; моделирование; модель; оптимизация; model predictive control; MPC; ПИД-регулятор.

The principle of management based on a predictive model (model predictive control) as one of the most promising management methods is disclosed. The theoretical aspects of this approach implementation, its advantages and disadvantages are presented. The algorithm for the implementation of this approach in relation to the SISO-system on the example of an ideal second-order model is described. The results of modeling in comparison with the classical PID controller are given. The influence of modeling errors on the regulator operation is considered.

Keywords: management; prediction; modeling; model; optimization; model predictive control; MPC; PID-regulator.

Введение. Современное технологическое производство характеризуется большим количеством измеряемых и регулируемых параметров, работает в жёстких условиях и ограничениях как по времени, так и по ресурсам. Применение систем усовершенствованного управления технологическим процессом (СУТП или системы advanced process control) [1] на предприятиях приводит к снижению потерь и эксплуатационных затрат, увеличению прибыли производства путём вывода всей цепочки технологических процессов на оптимальный режим работы. Оптимизация производства проводится на нескольких уровнях — от обще-заводского до локального. На нижнем уровне непосредственное управление осуществляется за счёт локальных регуляторов, из которых наиболее распространённым является пропорциональный интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор. На его долю приходится более 80 % всех задач управления с обратной связью [2]. Иногда такие регуляторы применяются в каскадных и комбинированных схемах управления, однако в задачах управления нелинейными, слабо определёнными, много-

связными объектами и процессами с большим временем запаздывания они не способны обеспечить достаточное качество регулирования.

Основная часть. В начале 1960-х гг. в нефтехимическом и энергетическом производстве впервые были применены методы GMV (обобщённая минимальная дисперсия), которые позволяли управлять процессами с задержкой по времени и неучтёнными параметрами. Модификации данного метода в конечном счёте привели к разработке управления на основе прогнозирующей модели (model predictive control — MPC) [3]. Впервые такой подход использован компанией «Шелл Ойл» (Shell Oil) и некоторыми нефтеперерабатывающими заводами (НПЗ) в конце 1970-х гг. На сегодняшний день это вторая по распространённости методика управления в промышленности (после традиционного ПИД-регулирования). Ведущими организациями, применяющими MPC, являются такие компании, как Aspen Technology, Honeywell, Invensys и ABB.

В основе метода лежат прогнозирующие модели объектов управления, преимущественно являющиеся эмпирическими, разра-

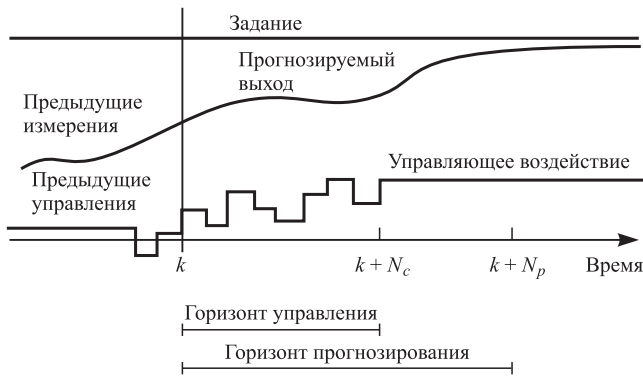


Рис. 1. Сущность метода управления на основе прогнозирующей модели

ботанными в ходе испытаний на предприятиях. Этот метод также известен как управление с отступающим горизонтом или со скользящим горизонтом (рис. 1). В нём применяется ряд способов управления, использующих явную динамическую модель процесса для прогнозирования влияния будущих реакций, управляемых (регулируемых) переменных на выходе и управляющий сигнал, полученный путём минимизации целевой функции управления [4]. В алгоритмах MPC используется численная оптимизация для нахождения оптимального варианта управления на некотором временном горизонте в будущем, основываясь на модели процесса. Качество регулирования зависит от того, насколько хорошо динамика системы описывается моделью, используемой для синтеза регулятора [5].

Алгоритм метода управления на основе прогнозирующей модели заключается в следующем:

- 1) задаётся объект;
- 2) устанавливается цель управления — обеспечение выполнения равенств, где заданные векторные функции определяют некоторое заданное движение объекта (равенств может быть много);
- 3) для упрощённой модели объекта и начальных условий осуществляется прогнозирование его поведения на некотором конечном отрезке времени, называемом горизонтом прогноза (N_p), под воздействием управляющего сигнала $u(k + j|k)$, $j = 1, 2, \dots, N_p - 1$, где k — начальный момент времени;
- 4) выполняется оптимизация управляющего сигнала с учётом всего комплекса ограничений, наложенных на управляющие и регулируемые переменные, находят оптимальный вариант управления;

5) на временном отрезке, определяемом одним шагом вычисления, составляющим фиксированную малую часть горизонта прогноза, называемом горизонтом управления (N_c), реализуется найденный оптимальный вариант управления;

6) в систему управления процессом посылается только текущий управляющий сигнал $u(k|k)$;

7) по окончании интервала осуществляется измерение фактического состояния, данные которого принимаются за новые начальные условия;

8) горизонт прогноза сдвигается на шаг вперёд, и повторяются пп. 3—6 данной последовательности действий.

Существуют различные коммерческие варианты реализации метода управления на основе прогнозирующей модели: Dynamic Matrix Control (DMC), Model Algorithmic Control (MAC), Predictive Functional Control (PFC), Extended Prediction Self-Adaptive Control (EPSAC), Extended Horizon Adaptive Control (EHAC), Generalized Predictive Control (GPC) [6].

Основными преимуществами MPC перед структурированными ПИД-регуляторами являются его способность справляться с ограничениями, неминимально-фазовыми процессами, простота построения и использования в системах управления. Применение обратной связи позволяет учитывать изменения параметров системы и сохранять устойчивость к помехам (робастность) [7, 8].

Структура системы управления на основе прогнозирующей модели представлена на рис. 2. В общем случае MPC описывает только подход к проектированию управления, а не конкретный алгоритм. Пользователь должен интерпретировать подход для создания алгоритма, подходящего для его собственных нужд.

В большинстве случаев метод на основе MPC используется для управления многопараметрическими объектами и чаще всего не

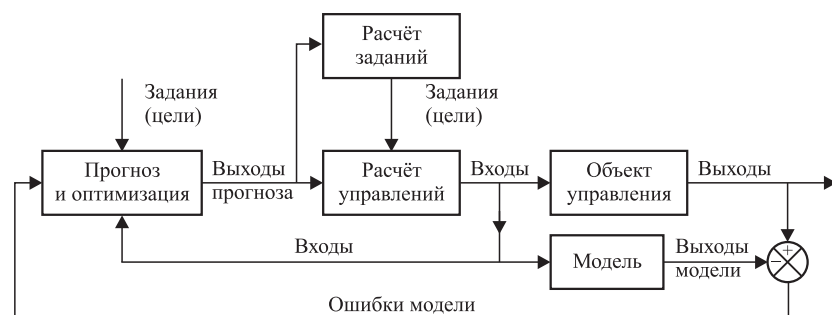


Рис. 2. Структура метода MPC

рассматривается в качестве локального регулятора, например ПИД-регулятора.

В данной статье описана реализация MPC-регулятора для одного измеряемого параметра и одного управляющего выхода (SISO) для системы управления программируемых логических контроллеров (ПЛК), как альтернатива применяемым в них классическим ПИД-регуляторам.

Для проведения исследований алгоритмов работы MPC-регулятора выберем в качестве объекта управления идеальную модель второго порядка, дифференциальная модель которой выглядит следующим образом:

$$T_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_1 \frac{dy}{dt} + y(t) = u(t)K.$$

Запишем уравнение в пространстве состояний:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\frac{T_1}{T_2}x_1 - \frac{1}{T_2}x_2 + \frac{K}{T_2}u; \\ \dot{x}_2 &= x_1. \end{aligned}$$

Представим прогнозирующую модель в пространстве состояний:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k; \quad (1)$$

$$y_k = Cx_k, \quad (2)$$

$$\text{где } x_k^T = [y_k \quad y_k] \text{ и } A = \begin{bmatrix} -\frac{T_1}{T_2} & -\frac{1}{T_2} \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} K \\ T_2 \end{bmatrix}, C = [1 \quad 0].$$

Здесь и далее через k обозначим такт (момент времени с начала отсчёта), т. е. $x_k = x_{t+k}$, где t — начальное время; $k + 1$ — следующий такт, $x_{k+1} = x_{t+kdt}$; dt — период дискретизации.

Рассмотрим задачу регулирования от начала координат дискретно-временной линейной инвариантной системы, описываемой уравнениями (1) и (2) при выполнении ограничений

$$u_{\min} \leq u_k \leq u_{\max}$$

в каждый момент времени k .

Предположим, что доступно полное измерение состояния x_k на текущий момент k . Тогда задача оптимизации решается так:

$$\min_u \{J(U, x_k)\}$$

при условии

$$u_{\min} \leq u_{k+i} \leq u_{\max}, \quad i = 0, 1, \dots, N_p;$$

$$x_{k|k} = x_k;$$

$$x_{k+i|k} = Ax_{k+i|k} + Bu_{k+i}, \quad i \geq 0;$$

$$y_{k+i|k} = Cx_{k+i|k}, \quad i \geq 0;$$

в каждый момент k ,

$$\text{где } U \triangleq \{u_k, \dots, u_{k+N_c-1}\}, \quad i < N_c;$$

$$U = u_{k+N_c-1}, \quad i \geq N_c;$$

$$\begin{aligned} \{J(U, x_k)\} &\triangleq \sum_{i=1}^{N_p} (x_{k+i|k}^T - r_{k+i|k}^T)Q(x_{k+i|k} - r_{k+i|k}) + \\ &\quad + \sum_{i=1}^{N_c-1} u_{k+i}^T R u_{k+i}. \end{aligned}$$

Здесь $x_{k+i|k}$ — предсказанный вектор состояния в момент времени $k + i$, полученный путём применения последовательности управления u_k, \dots, u_{k+i-1} к модели, описанной уравнениями (1) и (2), с момента x_k ; $r_{k+i|k}$ — вектор заданной траектории; N_p — горизонт прогноза; N_c — горизонт управления; Q и R — квадратные симметричные и положительно определённые матрицы.

Результатом процедуры оптимизации, предсказывающей на конечном горизонте N_p , является оптимальная управляющая входная последовательность U , минимизирующая целевую функцию J . Даже если вся последовательность входных сигналов найдена, только первый элемент u_k поступает на вход системы. Для компенсации возможных ошибок моделирования или возмущений, действующих на систему, на такте $k + 1$ проводится новое измерение состояния $x_{k+1|k+1}$, и вся процедура повторяется.

В приведённом алгоритме используется конечный горизонт прогноза N_p . Ряд исследователей предлагает использовать бесконечный горизонт для получения устойчивого управления, если результирующая последовательность управления минимизирует целевую функцию на бесконечном горизонте [9, 10]. Но использование бесконечного горизонта ведёт к увеличению расчётов на каждом такте и может потребовать большего процессорного времени. Так как планируется использовать этот подход для систем реального времени, которым являются ПЛК, применение бесконечного горизонта неприемлемо. Поэтому в случае конечного горизонта выбор времени горизонта прогноза N_p чрезвычайно важен.

Таким образом, алгоритм управления выглядит следующим образом:

1) измерение (или вычисление) текущих состояний x_k ;

2) нахождение последовательности оптимальных управляющих величин $U \triangleq \{u_k, \dots, u_{k+N_c-1}\}$;

3) применение только первого u_k , остальные отбрасываются;

4) повторение процедуры в момент времени $k + 1$, переход к п. 1.

В качестве оптимизационного алгоритма нахождения оптимальных управляющих величин $U = \{u_k, \dots, u_{k+N_c-1}\}$ используется простейший метод покоординатного спуска Гаусса — Зейделя.

Основными настроечными параметрами регулятора выбирают:

N_p — горизонт прогноза;

N_c — горизонт управления;

T_i — время перерасчёта алгоритма и нахождения оптимальных управляющих величин.

Для проверки алгоритма работы MPC-регулятора была написана программа для ЭВМ на языке высокого уровня C++ (рис. 3). В программе можно задать начальные значения (в момент времени t) состояний x_0 , начальное значение управляющей величины u_0 , ввести значения настроечных параметров (N_p , N_c , T_i) и задание регулятора (SP). По команде пользователя программа проводит процедуру имитации работы регулятора на основе прогнозирующей модели до момента стабилизации регулирующего параметра. В процессе работы вычисляются квадратичная ошибка регулирования J и время выполнения всего алгоритма, в том числе с расчётом модели объекта управления. Выходные данные формируются в виде файла таблично-го вида с полученными данными моделирования и показателями работы алгоритма.

Проверка работоспособности программы проведена со следующими параметрами модели и регулятора: $T_1 = 10$; $T_2 = 2$; $K = 2,5$; $N_p = 10$; $N_c = 2$; $T_i = 0,5$; SP (задание) = 30. Начальные значения состояний модели заданы нулевыми значениями. Время дискретизации модели dt установлено по умолчанию 0,1 с. Анализ выходных данных программы и результатов расчётов в математическом пакете показал расхождение менее 0,001 %. Эти параметры модели будут использованы для дальнейших исследований.

Исследование поведения модели системы управления при изменении задания регулятора проводилось в порядке SP = 30, 50, 15, 60 (рис. 4).

В качестве сравнения работы MPC-регулятора были проведены аналогичные ис-

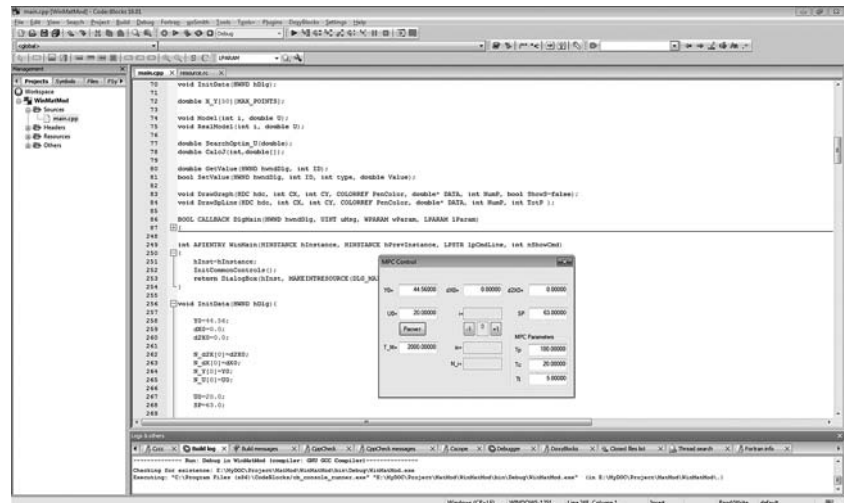


Рис. 3. Программа моделирования регулятора на основе MPC и её интерфейс

следования с использованием классического ПИД-регулятора, для которого использовались оптимальные параметры. На рис. 5 показаны сравнительные графики переходных процессов для MPC- и ПИД-регуляторов.

Из приведённых результатов видно, что для инерционных процессов ПИД-регулятор накапливает большое значение интегральной составляющей, которое не лучшим образом сказывается на качестве регулирования, что особенно заметно при изменении задания с 50 на 15.

Получены следующие показатели качества регулирования (без учёта изменения задания с 50 до 15):

квадратичная ошибка MPC-регулятора меньше на 11,45 %, чем ПИД-регулятора;

время выхода на задание (в диапазон 1 % при изменении задания на 10 %) среднее для

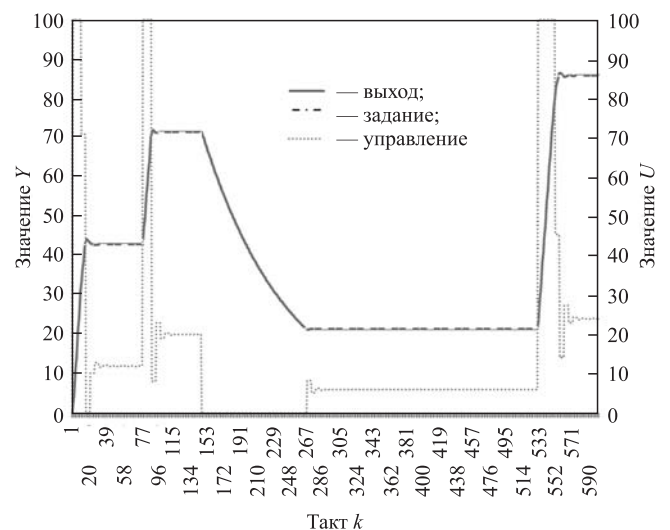


Рис. 4. Переходные процессы системы управления при изменении задания MPC-регулятора

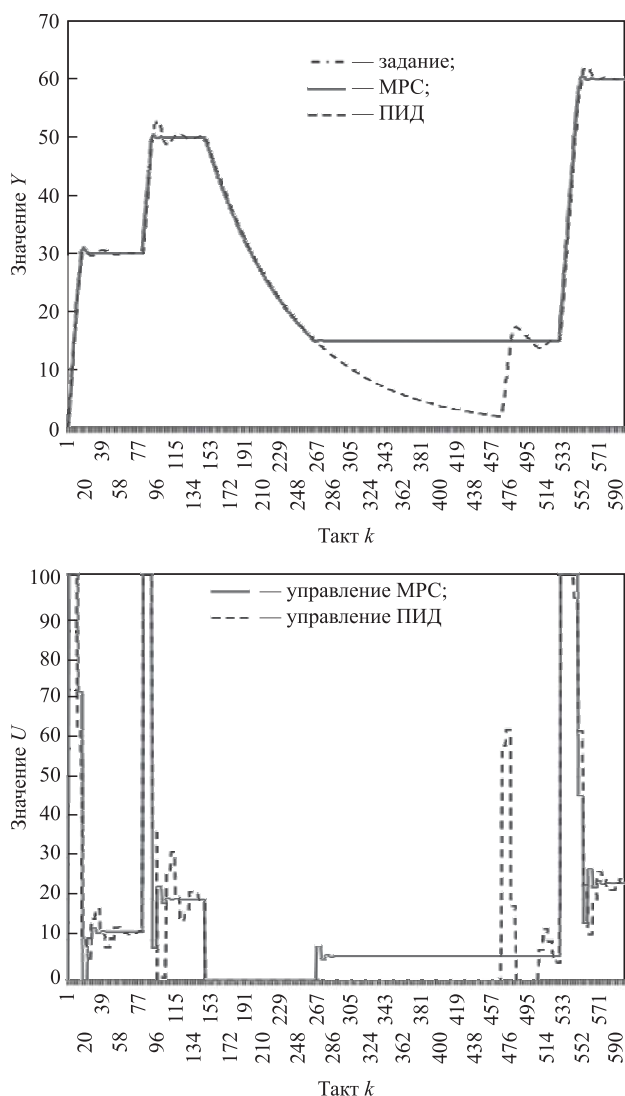


Рис. 5. Переходные процессы системы управления при изменении задания МРС- и ПИД-регуляторов и изменение управляющего воздействия во времени

МРС-регулятора — 1,25 такта, для ПИД-регулятора — 3,84 такта;

среднее перерегулирование МРС-регулятора — 1,48 %, ПИД-регулятора — 3,47 %.

Анализируя полученные показатели, можно сделать вывод, что регулятор на основе прогнозирующей модели может заменить классический ПИД-регулятор, обеспечивая при этом более высокое качество управления, минимальное перерегулирование и быстрый выход на задание, при условии высокой вычислительной мощности процессора.

В проведённых исследованиях в качестве прогнозирующей модели использовалась идеальная модель. Для компенсации возможных ошибок моделирования или возмущений, действующих на систему, и обеспечения ро-

бастности системы [11] в прогнозирующую модель введём обратную связь корректировки:

$$x_{k+i+1|k} = Ax_{k+i|k} + Bu_{k+i} + \delta_{k+i|k}, i \geq 0,$$

где $\delta_{k+i|k}$ — значение дополнительного возмущения на выходе процесса в момент $k+i$ на основе информации, доступной в момент k .

Это возмущение может быть вызвано ошибками моделирования, несовершенством измерительной техники, внешними случайными факторами и изменениями параметров модели.

Устойчивость системы регулирования проверялась путём внесения изменений в имитационную модель, при этом прогнозирующая модель оставалась неизменной. Переходные процессы системы с ошибками моделирования приведены на рис. 6. Кривая 1 — эталонная работа регулятора без ошибки моделирования. Кривая 2 показывает работу регулятора без учёта ошибки, т. е. без учёта обратной связи в прогнозирующей модели, как описано выше. Кривые 3—6 показывают влияние параметров модели на процесс управления.

Результаты работы вполне можно считать удовлетворительными, за исключением случая, когда допущена грубая ошибка (двукратная) при определении K объекта управления (кривая 6).

Таким образом, можно сделать вывод, что незначительные отклонения параметров моделируемого объекта или ошибки при моделировании могут быть нивелированы данным типом регулятора, что представляет собой важное свойство в системах с непостоянными параметрами.

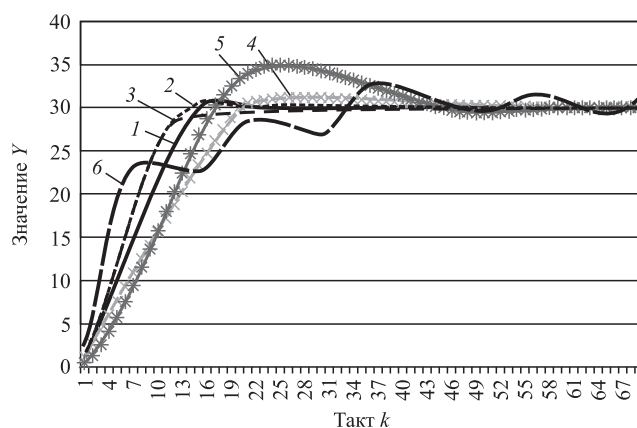


Рис. 6. Переходные процессы системы:

1 — без ошибки моделирования; 2 — без учёта ошибки; 3 — с учётом ошибки в K ; 4 — с учётом ошибки в T_1 ; 5 — с учётом ошибки в T_2 ; 6 — с учётом двукратной ошибки в K

Работа МРС-регулятора зависит от его настроек, поэтому поиск их оптимальных значений является важной задачей. Каждый параметр N_p , N_c , T_i оказывает влияние на качество регулирования, скорость расчёта оптимальных управлений и чувствительность управляющей системы. Критериями выбора являются минимизация квадратичной ошибки и скорость расчёта поиска оптимального варианта управления.

В ходе работы по нахождению параметров выяснилось следующее: если процесс протекает довольно быстро, то одним из определяющих параметров является время перерасчёта алгоритма T_r , уменьшение которого повышает частоту перерасчёта. Уменьшение данного параметра до критических значений может привести к ситуации, когда время, требующееся для перерасчёта, может оказаться больше T_i и алгоритм (да и весь процесс регулирования) может перестать справляться с расчётами, реагировать с большим запаздыванием или вообще остановиться по причине большой вычислительной нагрузки, что особенно актуально для систем реального времени. Кроме того, могут существовать такие наборы настроечных параметров, при которых достигаются ана-

логичные показатели регулирования и при более высоких значениях T_r . Из полученных результатов установлено, что при увеличении T_r до 0,2 отклонение от оптимального составляет всего 0,048 %, а при $T_r = 0,5$ — 0,579 %, что вполне достаточно в реальной системе, но при этом время расчёта снижается с 0,31 с до долей миллисекунд.

Параметр N_c в основном оказывает влияние на скорость расчётов, так как непосредственно участвует в подборе количества оптимизируемых управляющих воздействий. Большое значение N_c ведёт к увеличению качества регулирования. Например, при количестве рассчитанных точек от 5 и более качество регулирования достигает максимального значения, при значениях менее 5 сказывается несильно, но существенно влияет на время расчёта от долей секунд до 0,121 с. При равенстве $N_p = T_i$ оказывается негативное влияние на качество регулирования — отклонение от 10 до 393 %, хотя при этом время расчёта практически остаётся минимальным.

Время прогнозирования N_p сильно зависит от других параметров. При хорошо подобранных N_c и T_r , увеличение N_p ведёт к повышению

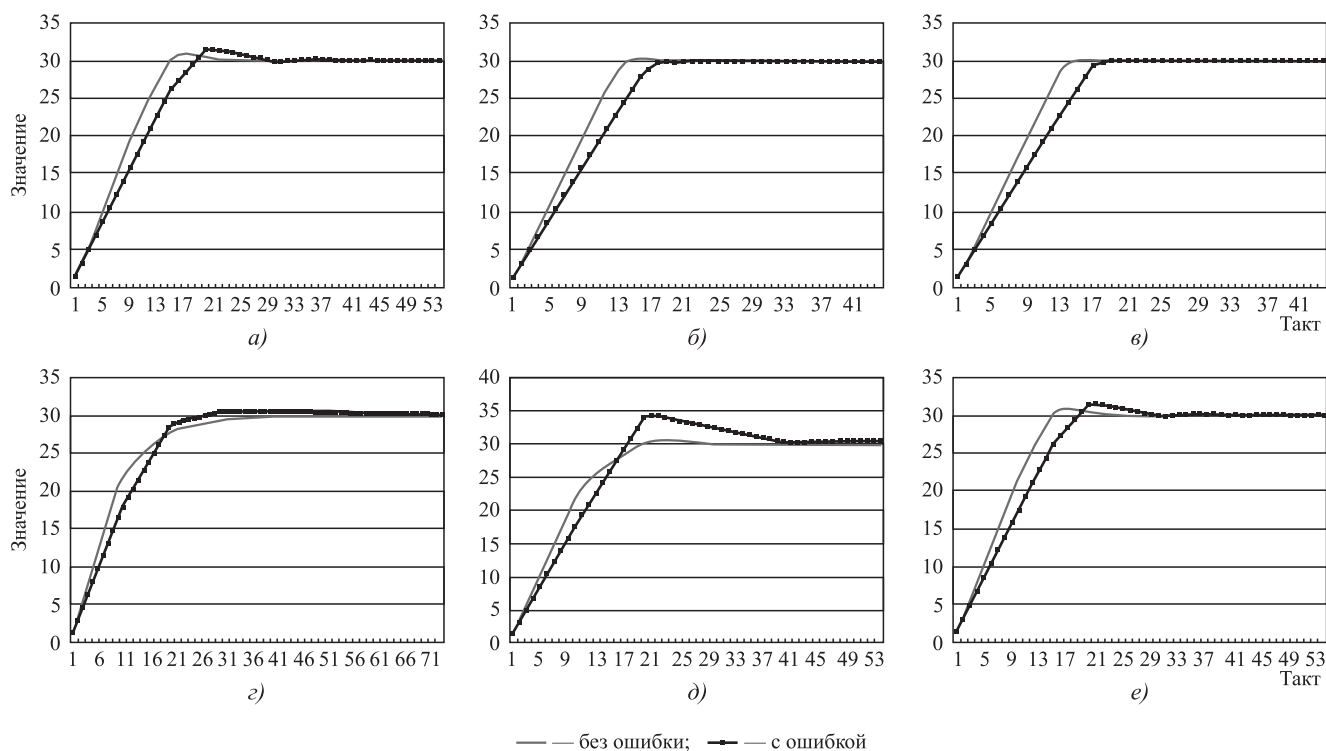


Рис. 7. Переходные процессы системы с ошибкой моделирования при различных параметрах регулятора:

a — набор 23 — $N_p = 10$, $N_c = 2$, $T_i = 0,5$; b — набор 11 — $N_p = 2$, $N_c = 1$, $T_i = 0,2$; $в$ — набор 8 — $N_p = 10$, $N_c = 4$, $T_i = 0,1$; $г$ — набор 29 — $N_p = 2$, $N_c = 1$, $T_i = 1$; $д$ — набор 30 — $N_p = 5$, $N_c = 2$, $T_i = 1$; $е$ — набор 20 — $N_p = 2$, $N_c = 2$, $T_i = 0,5$

устойчивости системы, но возрастает время расчёта и снижается качество регулирования.

В общем случае настроечные параметры выбираются индивидуально для вычислительной системы и системы управления в целом.

Для выяснения стабильности системы и её робастности в реальную модель были внесены изменения, при этом прогнозирующая модель оставалась без изменений, имитируя тем самым ошибки моделирования. Приняты следующие параметры модели: $T_1 = 15$, $T_2 = 2$, $K = 2,8$. Параметры регулятора выбраны расчётным путём представительно из каждой большой группы (наборы). Результаты представлены на рис. 7.

Результаты моделирования показали, что регулятор при всём разнообразии параметров справляется с поставленной задачей и показывает достаточную устойчивость.

Заключение. Принцип управления на основе прогнозирующей модели (МРС) показал свою эффективность в системах локального регулирования реального времени. На примере сравнения с ПИД-регулятором выделены очевидные преимущества, которые делают его одним из перспективных способов управления. Он обеспечивает отличные показатели качества регулирования и устойчивости. Наиболее эффективное его применение видится в процессах с длительными переходными процессами и с большим временем запаздывания, когда расчёт прогнозирующей модели можно растянуть во времени.

Библиографические ссылки

1. Дозорцев В.М., Кнеллер Д.В. APC — усовершенствованное управление технологическими процессами // Датчики и системы. 2005. № 10. С. 56—62.
2. Holkar K.S., Waghmare L.M. An Overview of Model Predictive Control // International Journal of Control and Automation International Journal of Control and Automation. 2010. Vol. 3. No. 4. P. 47—63.
3. Rawlings J.B. Tutorial: Model Predictive Control Technology / Proceedings of the American Control Conference. San Diego, California, 1999. P. 662—676.
4. Holkar K.S., Waghmare L.M. Discrete Model Predictive Control for DC drive Using Orthonormal Basis function / UKACC International Conference on CONTROL. Coventry, UK, 2010. P. 435—440.
5. Mohanty S. Artificial neural network based system identification and model predictive control of a flotation column // Journal of Process Control. 2009. Vol. 19. P. 991—999.
6. Camacho E.F., Bordons C. Model Predictive Control. Springer publication. London, 2007.
7. Richalet J. Industrial applications of model based predictive control // Automatica. 1993. Vol. 29. P. 1251—1274.
8. Abu-Ayyad M., Dubay R. Real-time comparison of a number of predictive controllers // ISA Transactions. 2007. Vol. 46. P. 411—418.
9. Zheng T. Model Predictive Control. Sciyo Janeza Trdine, Croatia, 2010.
10. Kothare M., Balakrishnan V., Morari M. Robust constrained model predictive control using linear matrix inequalities // Automatica. 1996. Vol. 32(10). P. 1361—1379.
11. Garcia C.E., Prett D.M., Morari M. Model Predictive Control: Theory and Practice a Survey // Automatica. 1989. Vol. 25. No. 3. P. 335—348.

Ссылка для цитирования

Колодин А.А. Управление на основе прогнозирующей модели в системах локального регулирования // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 11. С. 521—527.

Требования к оформлению библиографических ссылок

Список литературных источников, на которые делаются ссылки в тексте статьи, составляется в порядке цитирования и оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1—2003 и ГОСТ Р 7.0.5—2008 (указываются фамилии и инициалы авторов, точное название книги или сборника, издательство, год и место издания, количество страниц в книге, а для журнальных статей — фамилии и инициалы авторов, название статьи, название, год выхода и номер журнала, страницы размещения статьи). При ссылке на электронные ресурсы обязательно указывать дату обращения, например, 26.06.2017. Ссылки на иностранную литературу даются на языке первоисточника без сокращений. Согласно требованиям зарубежных баз данных, список литературных источников необходимо также транслитерировать на латинский шрифт (фамилия и инициалы авторов, название источника публикации и место издания), при этом технические сокращения должны быть переведены с использованием общепринятых обозначений (номер — No., том — Vol., страница — P. и т. п.). Для транслитерации русскоязычных наименований можно воспользоваться сервисом <http://translit.ru/>.



ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛОВ

Влияние гармонических составляющих некруглости и нецилиндричности на формирование НДС поверхностных слоёв деталей в соединениях с натягом. *Вестник машиностроения.* 2020. № 4.

Представлены результаты исследования влияния гармонических составляющих некруглости и нецилиндричности на формирование напряжённо-деформированного состояния (НДС) поверхностных слоёв деталей в соединениях с натягом. Установлено, что для повышения надёжности неподвижных соединений деталей в погрешностях формы высокоточных посадочных поверхностей необходимо минимизировать амплитуды гармонических составляющих низкочастотного диапазона 2, 3 и 4-го порядков и сформировать изотропный микрорельеф.

Контроль и управление устойчивостью стрелового самоходного крана при динамическом нагружении. *Вестник машиностроения.* 2020. № 4.

Разработана система контроля и управления устойчивостью стрелового самоходного крана при динамическом нагружении. Рассматривается имитационное моделирование с учётом изгибной деформации элементов и работы системы гидропривода грузоподъёмного крана в сочетании с интерактивным программным управлением. Имитационное моделирование основано на интеграции пакетов Simulink и Fuzzy Logic Toolbox, программы MatLab и системы трёхмерного моделирования САПР SolidWorks.

Восстановление поверхности роликов охлаждения установки непрерывной разливки стали электродуговой наплавкой. *Заготовительные производства в машиностроении.* 2020. Т. 18. № 4.

Исследование посвящено выбору наплавочных материалов для изготовительной и (или) восстановительной электродуговой наплавки роликов зоны вторичного охлаждения установки непрерывной разливки стали, изготовленных из стали 24ХМ1Ф для повышения их срока эксплуатации.

Оценка характера влияния противонапряжения на стабильность напряжения волочения проволоки заготовки. *Заготовительные производства в машиностроении.* 2020. Т. 18. № 4.

Выполнен расчёт первых производных осевого напряжения волочения проволоки по коэффициентам трения, вытяжки и деформационного упрочнения. Показано уменьшение указанных производных при увеличении напряжения противонапряжения, что указывает на целесообразность использования станков для волочения с противонапряжением в целях стабилизации силы волочения и снижения усталостного износа рабочей поверхности волокна.

Исследование закономерностей изменения коэффициента трения скольжения в инновационных методах комбинированного дорнования отверстий. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2020. Т. 16. № 4.

С использованием теоретических основ адгезивно-деформационной теории трения исследованы закономерности изменения коэффициента трения скольжения в инновационных методах дорнования отверстий инструментом с регулярным микрорельефом воздействующих поверхностей в условиях применения современных металлоплакирующих смазок, реализующих фундаментальное научное открытие «Эффект безызносности при трении Гаркунова—Крагельского».

Методы отделочно-упрочняющей обработки длинных валов резанием и поверхностным пластическим деформированием. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2020. Т. 16. № 4.

Представлены технологические методы отделочно-упрочняющей обработки длинных валов. Показано, что одним из прогрессивных методов обработки длинных валов и труб может быть совмещённая обработка резанием и поверхностным пластическим деформированием. Предложена технологическая схема обработки без применения токарного станка и средства её реализации.

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу «Пресса России» — 27838) или непосредственно в издательстве по e-mail: realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефон для справок: (495) 785-60-69

Сдано в набор 01.09.2020.

Подписано в печать 15.10.2020.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

Отпечатано в ООО «Канцлер»

150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.

Оригинал-макет: ООО «Авансед солюшнз».

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация. Современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала. При перепечатке материалов ссылка на журнал «Автоматизация. Современные технологии» обязательна. За содержание рекламных материалов ответственность несёт рекламодатель
