

ISSN 1819-3161

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

6/2019

CONTROL  SCIENCES

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

С. Н. Васильев, академик РАН,
И. А. Каляев, академик РАН,
В. А. Левин, академик РАН,
Н. А. Махутов, чл.-корр. РАН,
Е. А. Микрин, академик РАН,
П. П. Пархоменко, чл.-корр. РАН,
А. Ф. Резчиков, чл.-корр. РАН,
Е. А. Федосов, академик РАН

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Ф. Т. Алескеров, д-р техн. наук,
В. Н. Афанасьев, д-р техн. наук,
Н. Н. Бахтадзе, д-р техн. наук,
Л. П. Боровских, канд. техн. наук
(зам. гл. редактора),
В. Н. Бурков, д-р техн. наук,
В. М. Вишневский, д-р техн. наук,
М. И. Гераськин, д-р экон. наук,
С. А. Краснова, д-р техн. наук,
О. П. Кузнецов, д-р техн. наук,
В. В. Кульба, д-р техн. наук,
А. Г. Кушнер, д-р физ.-мат. наук,
А. А. Лазарев, д-р физ.-мат. наук,
В. Г. Лебедев, д-р техн. наук,
В. Е. Лепский, д-р психол. наук,
А. С. Мандель, д-р техн. наук,
Р. В. Мещеряков, д-р техн. наук,
А. И. Михальский, д-р биол. наук,
Д. А. Новиков, чл.-корр. РАН
(гл. редактор),
Б. В. Павлов, д-р техн. наук,
Ф. Ф. Пашченко, д-р техн. наук
(зам. гл. редактора),
Л. Б. Рапопорт, д-р физ.-мат. наук,
С. В. Ратнер, д-р экон. наук,
Е. Я. Рубинович, д-р техн. наук,
В. Ю. Рутковский, д-р техн. наук,
М. В. Хлебников, д-р физ.-мат. наук,
А. Д. Цвиркун, д-р техн. наук,
П. Ю. Чеботарёв, д-р физ.-мат. наук,
И. Б. Ядыкин, д-р техн. наук

РУКОВОДИТЕЛИ РЕГИОНАЛЬНЫХ РЕДСОВЕТОВ

Владивосток – О. В. Абрамов, д-р техн. наук,
Волгоград – А. А. Воронин, д-р техн. наук,
Воронеж – С. А. Баркалов, д-р техн. наук,
Курск – С. Г. Емельянов, д-р техн. наук,
Липецк – А. К. Погодаев, д-р техн. наук,
Пермь – В. Ю. Столбов, д-р техн. наук,
Ростов-на-Дону – Г. А. Угольницкий,
д-р техн. наук,
Самара – В. Г. Засканов, д-р техн. наук,
Саратов – В. А. Твердохлебов, д-р техн. наук,
Уфа – Б. Г. Ильясов, д-р техн. наук

ADVISORY BOARD

E. A. Fedosov, Academician of RAS¹,
I. A. Kalyaev, Academician of RAS,
V. A. Levin, Academician of RAS,
N. A. Makhutov, Corr. Member of RAS,
E. A. Mikrin, Academician of RAS,
P. P. Parkhomenko, Corr. Member of RAS,
A. F. Rezchikov, Corr. Member of RAS,
S. N. Vassilev, Academician of RAS

EDITORIAL BOARD

V. N. Afanasev, D. Sc. (Tech.),
F. T. Aleskerov, D. Sc. (Tech.),
N. N. Bakhtadze, D. Sc. (Tech.),
L. P. Borovskikh, Ph. D. (Tech.),
Deputy Editor-in-Chief,
V. N. Burkov, D. Sc. (Tech.),
P. Yu. Chebotarev, D. Sc. (Phys.-Math.),
M. I. Geraskin, D. Sc. (Econ.),
M. V. Khlebnikov, D. Sc. (Phys.-Math.),
S. A. Krasnova, D. Sc. (Tech.),
V. V. Kulba, D. Sc. (Tech.),
A. G. Kushner, D. Sc. (Phys.-Math.),
O. P. Kuznetsov, D. Sc. (Tech.),
A. A. Lazarev, D. Sc. (Phys.-Math.),
V. G. Lebedev, D. Sc. (Tech.),
V. E. Lepskiy, D. Sc. (Psych.),
A. S. Mandel, D. Sc. (Tech.),
R. V. Meshcheryakov, D. Sc. (Tech.),
A. I. Michalski, D. Sc. (Biol.),
D. A. Novikov, Corr. Member of RAS,
Editor-in-Chief,
F. F. Pashchenko, D. Sc. (Tech.),
Deputy Editor-in-Chief,
B. V. Pavlov, D. Sc. (Tech.),
L. B. Rapoport, D. Sc. (Phys.-Math.),
S. V. Ratner, D. Sc. (Econ.),
E. Ya. Rubinovich, D. Sc. (Tech.),
V. Yu. Rutkovskii, D. Sc. (Tech.),
A. D. Tsvirkun, D. Sc. (Tech.),
V. M. Vishnevsky, D. Sc. (Tech.),
I. B. Yadykin, D. Sc. (Tech.)

LEADERS OF REGIONAL BOARDS

Kursk – S. G. Emelyanov, D. Sc. (Tech.),
Lipetsk – A. K. Pogodaev, D. Sc. (Tech.),
Perm – V. Yu. Stolbov, D. Sc. (Tech.),
Rostov-na-Donu, G. A. Ougolnitsky –
D. Sc. (Tech.),
Samara – V. G. Zaskanov, D. Sc. (Tech.),
Saratov – V. A. Tverdokhlebov, D. Sc. (Tech.),
Ufa – B. G. Ilyasov, D. Sc. (Tech.)
Vladivostok – O. V. Abramov, D. Sc. (Tech.),
Volgograd – A. A. Voronin, D. Sc. (Phys.-Math.),
Voronezh – S. A. Barkalov, D. Sc. (Tech.)

¹ Russian Academy of Sciences.



CONTROL SCIENCES

**Научно-технический
журнал**

6 номеров в год

ISSN 1819-3161

Издается с 2003 года

УЧРЕДИТЕЛЬ

Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН

Главный редактор
чл.-корр. РАН

Д.А. Новиков

Заместители главного
редактора

Л.П. Боровских, Ф.Ф. Пашенко

Редактор

Н.Е. Максимова

Выпускающий редактор

Л.В. Петракова

Издатель

ООО «Сенсидат-Плюс»

Адрес редакции
117997, ГСП-7, Москва,
ул. Профсоюзная, д. 65, к. 410.
Тел./факс (495) 334-92-00
E-mail: pu@ipu.ru
Интернет: http://pu.mtas.ru

Оригинал-макет и электронная версия
подготовлены
ИП Прохоров О. В.

Фото на четвертой странице обложки
В.М. Бабилова

Отпечатано в ООО «Авансдесолюшнз»
Заказ № PB619

Подписано в печать
14.11.2019 г.

Журнал зарегистрирован
в Министерстве Российской
Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств
массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-49203 от 30 марта 2012 г.

Журнал входит в RSCI на платформе
Web of Science и Перечень
рецензируемых научных изданий ВАК

Журнал включен в Российский индекс
научного цитирования (РИНЦ).
На сайте Научной электронной
библиотеки (www.elibrary.ru) доступны
полные тексты статей.

Подписные индексы:
80508 и **81708** в каталоге Роспечати;
38006 в объединенном каталоге
«Пресса России»

Цена свободная

© Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

6.2019

СОДЕРЖАНИЕ

Обзоры

Шевченко А.В., Мещеряков Р.В., Мигачев А.Н. Обзор состояния мирового рынка робототехники для сельского хозяйства. Ч. 2. Беспилотные летательные аппараты и роботизированные фермы 3

Анализ и синтез систем управления

Честнов В.Н., Александров В.А., Резков И.Г. Синтез одномерных дискретных регуляторов по инженерным критериям качества на основе модального управления 11

Хожаев И.В., Гайворонский С.А., Езангина Т.А. Адаптивно-робастная стабилизация корневых показателей качества интервальных систем на основе метода доминирующих полюсов 22

Управление в социально-экономических системах

Широкий А.А. Применимость базовых механизмов организационного управления на различных этапах комплексной деятельности 32

Информационные технологии в управлении

Соломатин А.Н. Метод связанных проекций и его применение для визуализации многомерных данных 41

Управление техническими системами и технологическими процессами

Зак Ю.А. Двухстадийные задачи планирования для поточной линии 52

Управление подвижными объектами и навигация

Кулида Е.Л., Лебедев В.Г., Егоров Н.А. Исследование эффективности алгоритма оптимизации потока воздушных судов на посадку 63

Хроника

XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ—2019) 70

Владимир Николаевич Бурков (к 80-летию со дня рождения) 76

* * *

Указатель статей, опубликованных в 2019 г. 77

Index of papers published in 2019 79



CONTROL SCIENCES

Scientific Technical Journal

6 issues per year

ISSN 1819-3161

Published since 2003

FOUNDER

V. A. Trapeznikov Institute
of Control Sciences
of Russian Academy of Sciences

Editor-in-Chief

D. A. Novikov, Corr. Member of RAS

Deputy Editors-in-Chief

L. P. Borovskikh, F. F. Pashchenko

Editors

N. E. Maksimova, L. V. Petrakova

Publisher Sensidat-Plus LLC

Editorial address

65 Profsoyuznaya st., office 410,

Moscow 117997, Russia

☎/📠 +7 (495) 334-92-00

✉ pu@ipu.ru

URL: <http://pu.mtas.ru>

Design layout and electronic version

prepared by SP Prokhorov O. V.

Printed by Advanced Solutions LLC

Order No. PB619

Approved for print on 14.11.2019

The Journal is registered by the Ministry
of Press, Broadcasting and Mass Media
of the Russian Federation

Registration certificate of

ПИ № ФС 77-49203 of 30 March 2012

The Journal is included in RSCI
(Russian Science Citation Index)
on the platform Web of Science
and in the list of peer-reviewed
scientific publications of the HAC

On the website of the Scientific electronic
library (www.elibrary.ru) full texts of articles
are available.

Subscription indexes:

80508 and **81708** in the catalogue
of Rospechat;

38006 in the joint catalogue
«Press of Russia»

Free price

© V. A. Trapeznikov Institute of Control
Sciences of Russian Academy of Sciences

CONTROL SCIENCES

6.2019

CONTENTS

Surveys

Shevchenko, A.V., Meshcheryakov, R.V., Migachev, A.N. Review
of the World Market of Agriculture Robotics. Part 2. Unmanned Aerial
Vehicles and Robotic Farms 3

Analysis and Synthesis of Control Systems

Chestnov, V.N., Alexandrov, V.A., Rezkov, I.G. Synthesis of Discrete
Modal Siso Controllers by Engineering Performance Indices 11

Khozhaev, I.V., Gayvoronskiy, S.A., Ezangina, T.A. Adaptive-Robust
Stabilization of Root Indicators of Interval Systems Quality on a Basis
of Dominant Poles Method 22

Control in Social and Economic Systems

Shirokii, A.A. Basic Organizational Control Mechanisms Applicability
at Different Stages of Integrated Activity 32

Information Technologies in Control

Solomatina, A.N. Method of Connected Projections and its Use
for Multidimensional Data Visualization 41

Control of Complex Technological Processes and Productions

Zack, Yu.A. Two-Stage Planning Tasks for the Production Line 52

Moving Objects Control and Navigation

Kulida, E.L., Lebedev, V.G., Egorov, N.A. Study of the Effectiveness
of the Algorithm to Optimize the Aircraft Flow for Landing 63

Chronicle

XIII All-Russian Control Conference (VSPU—2019) 70

Vladimir Burkov (to the 80-th anniversary) 76

* * *

Index of papers published in 2019 79

ОБЗОР СОСТОЯНИЯ МИРОВОГО РЫНКА РОБОТОТЕХНИКИ ДЛЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА.

Ч. 2. Беспилотные летательные аппараты и роботизированные фермы

А.В. Шевченко, Р.В. Мещеряков, А.Н. Мигачев

Аннотация. Представлен обзор мирового рынка беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в части их применения в сельском хозяйстве. Описаны основные задачи сельского хозяйства, которые могут быть решены посредством БПЛА. Сделаны выводы о преимуществе БПЛА в сравнении со спутниками и малой авиацией. Приведены разработки основных игроков рынка БПЛА с кратким описанием технических характеристик аппаратов и технологий их работы. Представлен мировой опыт применения БПЛА в скотоводстве, растениеводстве (в том числе для борьбы с вредителями и внесения химикатов). Выделены основные преимущества и перспективы применения БПЛА в сельском хозяйстве. Дан обзор такого направления робототехники, как робофермы. Описаны технологии полной роботизации ферм и представлены к рассмотрению существующие мировые проекты городских ферм и робоферм. Рассмотрены преимущества и недостатки данных технологий. Сделаны выводы об эффективности и перспективности внедрения технологий БПЛА и робоферм в сельское хозяйство.

Ключевые слова: БПЛА, робоферма, сельское хозяйство, рынок робототехники.

ВВЕДЕНИЕ

В первой части [1] представлен обзор мирового рынка беспилотной агротехники. Вторая часть посвящена применению в мировом сельском хозяйстве беспилотных летательных аппаратов, благодаря которому с каждым годом открываются новые инструменты и перспективы для аграриев. Крупные исследовательские компании предсказывают существенный рост данного сектора и лидерство агросектора в качестве сферы применения беспилотников. По оценкам компании «Price-waterhouse Coopers», через несколько десятков лет рынок одних «сельскохозяйственных» дронов (без учета беспилотников самолетного типа) может составить порядка 32,4 млрд. долл. США. Рынок БПЛА находится в стадии формирования и роста.

Основные игроки рынка сосредоточены в США и Китае. Среди крупнейших игроков мирового рынка БПЛА, которые ориентируются на сельское хозяйство, можно выделить таких представителей, как «AeroVironment Inc.», «AgEagle», DJI, «Yamaha» и др. Дистанционное зондирование на основе БПЛА дает широкие возможности для точного земледелия; БПЛА могут выступать не только мощным инструментом мониторинга, но и эффективно выполнять конкретные сельскохозяйственные операции.

Беспилотники внедряют и успешно применяют как в растениеводстве, так и в животноводстве. Основное преимущество применения БПЛА — в упрощении доступа к другим технологиям, которые позволят выращивать больше и тратить меньше, причем не только агрохолдингам, но и фермерам.

Логичное и перспективное направление роботизации ферм состоит в решении задачи полной автоматизации всех процессов выращивания агрокультур. Такие инновационные проекты уже разрабатываются и запускаются в мире. Робофермы призваны автоматизировать все процессы — от посева семян до сбора урожая в растениеводстве и полный цикл обслуживания дойного стада в животноводстве. Технический персонал управляет машинами из диспетчерской, никак физически не вмешиваясь в сами процессы.

1. БЕСПИЛОТНЫЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ

1.1. Обзор мирового рынка БПЛА и сферы их применения

Земледелие и сельское хозяйство в целом — одно из наиболее перспективных направлений применения беспилотных летательных аппаратов (дронов), в первую очередь, для решения задач точного земледелия. Система точного земледелия (англ. *precision farming*) — новый этап в развитии IT-агрономии. Это не строго определенный набор методик и технических средств, а, скорее, общая концепция, основанная на применении технологий спутникового позиционирования (GPS), геоинформационных систем (GIS), точного картографирования полей и пр. Решение задач точного земледелия невозможно без применения БПЛА.

По оценкам исследования компании «Juniper Networks», в 2016 г. до 48 % коммерческих дронов были задействованы в сельском хозяйстве. К 2026 г. этот показатель может дойти до 80 % [2]. А компания «MarketsandMarkets» в 2016 г. оценила рынок «сельскохозяйственных» БПЛА в 864,4 млн. долл., спрогнозировав до 2022 г. уверенный ежегодный рост отрасли в 30 % (до 4,2 млрд. долл.) [3].

Общемировой подход к применению беспилотников таков: это класс устройств, работающих на высоте до 120 м в пределах прямой видимости. Беспилотники в сельском хозяйстве внедряют США, страны Европы, Бразилия и Аргентина. Однако активнее всего инновация применяется в Китае, который занимает лидирующие позиции по производству БПЛА. В России в последнее время появилось много компаний-разработчиков беспилотников, но запчасти для них зачастую импортные. Беспилотники оснащаются мультиспектральными камерами, высокая четкость изображения которых позволяет точно определять проблемные участки поля. Аппараты также снабжаются разнообразными датчиками, системами спутниковой навигации, малогабаритными бортовыми компьютерами и оборудованием для внесения химикатов.

Дроны делятся на два больших класса: самолетного типа (или с неподвижным крылом) и мультироторного (коптеры). Одно из основных различий между ними — в том, что первые могут облететь за один полет территорию примерно в десять раз большую, чем коптеры. Однако высокая скорость ухудшает качество снимков.

Беспилотные летательные аппараты в сельском хозяйстве смогут решать следующие задачи [4, 5]:

- создание электронных карт полей (построение 3D-моделей полей);
- инвентаризация сельскохозяйственных угодий;
- оценка объема работ и контроль их выполнения в целях оптимального построения систем ирригации и мелиорации;
- оценка качества пропашности;
- оперативный мониторинг состояния посевов (БПЛА позволяет быстро и эффективно строить карты по всходам);
- отслеживание нормализованного вегетационного индекса растительности (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) в целях эффективного внесения удобрений;
- оценка всхожести сельскохозяйственных культур;
- выполнение посевных работ;
- прогноз урожайности сельскохозяйственных культур;
- экологический мониторинг сельскохозяйственных земель;
- охрана сельхозугодий;
- опрыскивание посевов химическими препаратами для борьбы с вредителями и болезнями;
- оценка химического состава почвы;
- мониторинг поголовья крупного и мелкого рогатого скота.

Применение БПЛА в сельском хозяйстве является экономически выгодной альтернативой малой авиации, а также спутникам. Приобретение и обслуживание беспилотника обходится дешевле любого пилотируемого летального аппарата. К тому же, многие задачи для сельского хозяйства БПЛА могут решить быстрее, чем спутники. Аэрофото-съемочный БПЛА позволяет получать снимки высокого разрешения в запрограммированных точках по GPS-координатам. Для каждого снимка получается полный набор цифровой информации, включающей в себя координаты центральной точки данных для переноса и использования в общепринятых системах (например, «ArcView» или «MapInfo»). Таким образом, все фотографии являются геопривязанными, и их можно сшить в один большой ортофотоплан поля.

Обзор мирового рынка БПЛА для сельского хозяйства представлен в таблице.



Беспилотные летательные аппараты для сельского хозяйства

Наименование, разработчик	Комплектация	Примечание
"RX60", "AgEagle" (США)	Автономен, multifunctional, размах крыльев 54 дюйма, крыло из углеродного волокна, автоматическая компенсация направления ветра. Устройство безопасности батареи контролирует состояние батареи и направляет летательный аппарат на место до окончания заряда блоков питания. Вмещается в багажное отделение автомобиля, обеспечивая легкость транспортировки	С помощью аэроснимков получает карты для оценки состояния урожая с выявлением критических зон. Уникальный дизайн обеспечивает полеты при высоких скоростях ветра (до 13 м/с)
"Agras MG-1", DJI (Китай)	Октокоптер для обработки полей пестицидами. На складывающихся плечах беспилотника смонтирована система трубок и разбрызгивающих форсунок, а под корпусом находится емкость вместимостью 10 л. Во время распыления дрон самостоятельно регулирует количество распыляемых пестицидов в зависимости от скорости передвижения	Максимальная скорость устройства 28 км/ч, производительность обработки полей от 7 до 10 га/ч. Полного заряда батареи хватает только на 12 мин, но при возврате на начальную точку и замене аккумулятора способен продолжить обработку поля с того места, на котором он остановился
"YMR-01", "YAMANA" (Япония)	Многовинтовой дрон для распыления химикатов выполнен по схеме гексакоптера. Передние и задние два его луча оснащены электромоторами с верхним расположением воздушных винтов. Два боковых луча имеют электромоторы с двумя воздушными соосными винтами, один из которых расположен снизу, а второй — сверху. Соосно боковым воздушным винтам расположены и форсунки распылителей химикатов	Один аппарат сможет распылять химикаты над полем площадью до 10,1 тыс. м ² . Беспилотник получил распыляющие системы компании "Yamabiko", которая и будет продавать "YMR-01" через свою дилерскую сеть
"SenceFly eBee SQ", "eBee" (США)	Мультифункциональный аппарат самолетного типа. Масса 1,1 кг, продолжительность полета до 55 мин. Поднимается на высоту до 120 м, разрешение 12 см/пиксель. Оснащен пятиспектральным сенсором "Sequoia" (четыре спектральных диапазона и видимый, RGB) и усовершенствованным программным обеспечением для планирования полета, управления им и обработки изображений	Номинальный охват 200 га с высоты 120 м. С камерой программно связан датчик солнечного освещения. В полете датчик постоянно регистрирует условия освещенности в тех же спектральных каналах, что и камера "Sequoia", в результате получают калиброванные значения яркости объектов съемки
"PrecisionHawk Lancaster 5", "PrecisionHawk" (Канада)	Мультифункциональный аппарат самолетного типа. Оборудован камерами трех типов — электрооптической, инфракрасной и мультиспектральной. Оснащен одним электрическим мотором, способным разгонять дрон до максимальной скорости 80 км/ч. Максимальное время нахождения в воздухе не более 40 мин, а максимальная дальность полета всего лишь 2 км	В дополнение к мультиспектральному сенсору, который ведет съемку поверхности, установлены сенсоры влажности, температуры, атмосферного давления, которые передают данные в режиме реального времени
"AgDrone", "HoneyComb" (США)	Мультифункциональный аппарат самолетного типа. Оснащен двумя камерами, которые четко передают детали полета оператору, собирают информацию и автоматически ее визуализируют. В дроне реализована усовершенствованная система автопилотирования "AgDrone System", которая позволяет устройству самостоятельно летать. Хорошо взаимодействует с бортовыми компьютерами сельскохозяйственной техники	Корпус из специального волоконного композита, делающего дрон ударопрочным. Максимальная скорость 82 км/ч. Может осуществлять мониторинг состояния посевов, создавать ортофотопланы
"Phoenix 2", "Sentera" (США)	Мультифункциональный аппарат самолетного типа. Имеет множество датчиков, включая "Sentera Double 4K Sensor" для получения RGB-изображений и данных стандартизированного индекса NDVI, которые он собирает за один полет, и "Sentera Quad Sensor" — мультиспектральный шестидиапазонный тепловизор с возможностями удаления красного цвета, что также популярно в приложениях для сельского хозяйства	Автопилот "Kestrel" обеспечивает точный захват изображений с автоматически рассчитываемым интервалом, который также может регулироваться оператором дистанционно. За один полет дрон облетает 40 га

Наименование, разработчик	Комплектация	Примечание
"UX5", "Trimble" (Франция)	Мультифункциональный аппарат самолетного типа. Оптимизированный для сбора данных с БПЛА фотограмметрический модуль "Trimble Business Center Photogrammetry Module" обрабатывает и представляет результаты в удобной форме: облако точек, треугольная нерегулярная сетка (TIN-модель) и карта изолиний местности, над которой осуществлялся полет. Оснащен дополнительной визуальной 24-мегапиксельной камерой "MicaSense RedEdge UX5" (захват данных с разрешением до 2 см/пиксель)	Работает в полностью автоматическом режиме и не требует навыка пилотирования. Оператору необходимо только контролировать полет, а встроенные программные задачи обеспечивают безопасный взлет и посадку при каждом запуске. Скорость полета — 80 км/ч, время полета — 50 мин. Может работать в сложных погодных условиях, сохраняя высокое качество съемки

Одним из лидеров рынка производителей беспилотников для сельского хозяйства является компания DJI (Китай), которая в 2015 г. разработала БПЛА «DJI Agras MG-1», обладающий влаго- и пылезащитными свойствами (дрон выполнен из материалов, не подверженных коррозии, в связи с чем после выполнения работы он может быть вымыт и сложен для транспортировки). Восьмимоторный «Agras MG-1» может нести до 10 кг опрыскивающей жидкости и обрабатывать площадь от 3,2 до 4 км²/ч. Это в 40 раз эффективнее ручного опрыскивания. Дрон может лететь со скоростью до 8 м/с и регулировать интенсивность опрыскивания в зависимости от скорости, не снижая при этом эффективность распыления (см. таблицу).

1.2. Мировой опыт применения БПЛА в скотоводстве

Дроны успешно применяются как в растениеводстве, так и в коммерческом скотоводстве. Летательные аппараты задействуются не только для выпаса крупного рогатого скота, но и для наблюдения за животными. Способность беспилотника создавать завихрения воздуха от винтов позволяет владельцам скотоводческих хозяйств пасти скот точно в границах своего пастбища. Кроме того, установка на дроны тепловых воздушных камер вроде «DJI Zenmuse XT» позволяет применять беспилотники для розыска коров в лесных зарослях, так как камера помогает отличить животных от других источников тепла. Камеры также могут быть эффективным инструментом для обнаружения опасных хищников, если те оказались поблизости.

Интерес к точному скотоводству в мире огромен. Например, в Канаде Исследовательским Советом по естественным наукам и инжинирингу был выделен трехлетний грант в размере почти 664 тыс. долл. на разработку инновационных ре-

шений в скотоводстве. Один из участников проекта доктор Дж. Черч из Технологического института Южной Альберты (Канада) задействовал в своих наработках дрон «DJI Phantom 3 Professional», чтобы показать, насколько применение таких устройств может быть эффективным для точного скотоводства уже в ближайшее время. Опыты показали, что многие типичные виды работ на скотоводческой ферме могут изначально выполняться намного быстрее с применением дронов. Например, речь может идти о ежедневном пересчете голов скота и выпасе коров (в последнем случае, как показала практика, даже самые лучшие собаки не всегда справляются со своими функциями). Среди новых идей доктора Черча — установка меток RFID на каждую корову, чтобы с помощью дрона и пакета программ можно было бы точно установить местонахождение любого животного и его состояние [6].

1.3. Мировой опыт применения БПЛА в растениеводстве

В растениеводстве БПЛА помогают не только проводить мониторинг состояния почвы, но и дифференцировано вносить удобрения, что особенно важно на полях с выраженной вариабельностью почвенного плодородия [6].

В сельском хозяйстве Японии агродроны применяют для полива полей, внесения удобрений и посева. Дроны, оснащенные специальными датчиками, могут определять, какие участки полей высыхают или нуждаются в обработке. Помимо этого, в процессе роста культур с помощью дронов можно рассчитать плотность и качество потенциального урожая. В 2012—2013 гг. на полях Японии трудились уже около 3000 агродронов, правда, большинство из них были бензиновыми и дизельными. Современные аппараты работают на аккумуляторных батареях.



Сейчас в Японии необходимо регистрировать беспилотные вертолеты для распыления пестицидов, удобрений и посева семян. Обязательная регистрация сельскохозяйственных дронов была введена в 2015 г. Число зарегистрированных аппаратов в январе 2018 г. достигло 673, что примерно в три раза превышает уровень марта 2017 г. [8]. Приобретение сельскохозяйственных БПЛА в Японии обходится гораздо дешевле, чем аренда обычных вертолетов для обработки посевов [9].

Самые популярные японские дроны, распыляющие пестициды, имеют резервуары вместимостью от 8 до 10 л. Для обработки 1 га рисовых полей требуется около 10 л пестицидов. Фермеру обычно нужно несколько часов, чтобы распылить такой объем жидкости на площади в 1 га, в то время как беспилотник может выполнить ту же работу примерно за 10 мин. В отличие от обычных беспилотных сельскохозяйственных вертолетов, БПЛА могут совершать очень резкие повороты. Также они не создают сильный воздушный поток, который может повредить листовые овощи.

Исследование рынка БПЛА позволило выделить ряд наиболее важных выполняемых ими операций в растениеводстве [10].

К примеру, БПЛА можно применять для:

- оценки подверженных засухе участков почвы и водных ресурсов;

- дистанционного зондирования состояния растений (технология дистанционного зондирования базируется на оценке цвета листьев и других частей растений по длине волны и коэффициенту отражения в видимой области спектра (RGB) и невидимом ИК-тепловом излучении. В качестве вторичных показателей состояния растений возможен анализ индекса NDVI, индекса поглощения хлорофилла (TCARI), индекса фотохимического отражения (PRI), оптимизированного вегетационного индекса почвы (OSAVI);

- дистанционного зондирования, проводимого в целях оценки обеспеченности растений водными ресурсами (рассчитывается разность между температурами листового покрова, воздуха, которые определяются устьичной проводимостью листьев с помощью тепловых нормированных индексов);

- дистанционного зондирования равномерности роста зерновых культур (результаты компьютерного анализа захваченных изображений показывают, где рост идет медленнее; основываясь на таком анализе, фермеры могут изменять количество вносимых удобрений и проделать другие корректировки для улучшения качества посевов и повышения урожайности);

- дифференциального внесения удобрений и пестицидов;

- дистанционного установления ущерба, причиняемого животными (если дрон запустить ночью, когда активны олени и дикие свиньи, то становится ясна картина поведения животных, откуда они приходят на ферму и чем занимаются).

Японский стартап «Skyrobot» разрабатывает систему на основе БПЛА для защиты сельскохозяйственных угодий от набегов диких животных. Компания предлагает свой программно-аппаратный комплекс, состоящий из квадрокоптера, камеры с ИК-датчиком и системы с искусственным интеллектом [11].

По задумке разработчиков, облетая подконтрольную территорию, дрон будет выявлять приближающихся к полям животных и отпугивать их с помощью высокочастотного сигнала или звуков разрыва петард. Благодаря специализированной камере, способной снимать как в обычном режиме, так и в инфракрасном, потенциальные нарушители не останутся незамеченными даже в ночное время и в лесной местности. Кроме того, система на основе искусственного интеллекта будет анализировать отснятые дроном материалы, чтобы по повадкам и следам животных прогнозировать их поведение.

1.4. Мировой опыт применения БПЛА для борьбы с вредителями

Применение БПЛА для борьбы с вредителями на полях началось несколько лет назад, поэтому ее методы постоянно совершенствуются. Уже сейчас дроны применяют на больших площадях, поскольку бункеры для средств защиты растений (СЗР), установленные на беспилотниках, стали весьма объемными.

Полет дрона может быть запрограммирован на внесение СЗР через определенные промежутки времени, а GPS-передатчик поможет проложить маршрут в поле. Идея состоит в том, чтобы объединить несколько дронов друг с другом в так называемый «рой», который будет перемещаться по полю и на соответствующих расстояниях разбрасывать биопрепараты, что значительно сократит и улучшит эффект от их применения. Такой метод внесения, например, трихограммы, будет идеальным для крупных плантаций в несколько сотен или тысяч гектаров, поэтому разработчики совершенствуют методы контроля работы таких устройств, чтобы они были максимально точными [12].

Несмотря на то, что дроны пока не так эффективны, как мини-авиация, они позволяют бороться с вредителями на тех плантациях, которые слишком велики для использования ручного труда, но малы для обработок мини-авиацией. Речь

идет, в частности, об обеспечении биозащиты для органических хозяйств, так как применение другого сельхозоборудования, которое задействуется одновременно и на участках с традиционной системой защиты, осложнено из-за необходимости его регулярной дезинфекции и очистки.

1.5. Мировой опыт применения БПЛА для внесения азотных удобрений

Исследовательская группа из Орхусского университета в Дании разработала способ, как точно определить потребности в азоте у отдельных растений. Их система опирается на исследование характеристик света, который отражается от листьев растений, в сочетании с площадью поверхности листа. Эти две переменные могут сказать с высокой степенью точности, сколько азота требуется растениям в данный момент.

На стадии тестирования ученые исследовали растения картофеля. Сейчас они работают над созданием БПЛА, который можно отправить в поле и выполнить быстрые анализы, основываясь на автоматизированных системах для измерения указанных параметров. По мнению исследователей, такие дроны помогут снизить применяемое количество азотных удобрений до минимально необходимой нормы.

По данным организации AUVSI, в отчете «The Economic Impact of Unmanned Systems Integration in the United States» (об этом говорится в официальном докладе Международной ассоциации беспилотных систем (Association for Unmanned Vehicle Systems)) сообщается о том, что применение БПЛА в сельском хозяйстве будет преобладать над всеми остальными методами («dwarf all others») и к 2025 г. около 80 % беспилотных машин будет занято в сельском хозяйстве США [13].

Компания DJI, крупнейший в Китае производитель коммерческих беспилотников видит большие перспективы для сельскохозяйственных дронов и планирует активизировать усилия по подготовке большего числа операторов для них. По данным DJI, на долю ее дронов серии MG приходится около 70 % продаж БПЛА сельхозназначения в Китае [14].

1.6. Преимущества применения БПЛА в сельском хозяйстве

Перечислим основные из них.

- Возможность сбора информации о растущих культурах, достаточной для точного применения пестицидов и гербицидов там, где необходимы химикаты. Это может позволить фермерам сэкономить на использовании химикатов, а

также снизить отрицательное влияние на окружающую среду.

- Возможность создавать картографическую основу с точными координатами всех объектов, что позволит в дальнейшем проводить визуальный анализ объектов с разрешением вплоть до нескольких сантиметров на пиксель. На эту основу можно будет нанести векторные слои: поля, дороги и другие объекты инфраструктуры. Такая основа дает возможность рассчитывать точные площади, расстояния, потребности в ресурсах и др. Будет удобно определять объективную площадь пашни, сенокосов, пастбищ, залежей, паров, зяби, сева, недосево и присево.
- Результаты аэрофотосъемки позволяют ставить участки на кадастровый учет.
- Аэрофотосъемка с БПЛА дает большую детализацию благодаря высоте полета от 100 до 600 м над поверхностью земли. Кроме того, беспилотники позволяют вести съемку даже в условиях облачности, что недоступно спутникам и затрудняет применение авиации.
- Получение снимков возможно даже в процессе полета, причем можно скорректировать полет в реальном времени, если заказчику это необходимо. Производительность БПЛА достигает 30 км²/ч при площадной съемке и до 35 км/ч для линейных объектов.
- Навигационные системы БПЛА помогают прокладывать оптимальные маршруты для движения сельхозтехники, чтобы избежать чрезмерного уплотнения почвы, из-за которого снижается урожай.
- Экономия трудовых ресурсов — БПЛА могут работать круглые сутки с высокой производительностью. По словам разработчиков, беспилотник может за три часа засеять 10 км² леса семенами, в то время как человеку для этого потребуются сутки.

В качестве перспективы можно определить переход от телеуправления к роботизированным системам, в которых дроны автоматически подзаряжают аккумуляторы, вылетают на маршруты по расписанию, выполняют облет и фотографирование (видеонаблюдение) в автоматическом режиме, возвращаются на место стоянки и передают информацию в систему автоматизированной обработки.

2. РОБОФЕРМЫ И ГОРОДСКИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ФЕРМЫ

Наибольшего успеха при внедрении роботов в сельское хозяйство можно добиться при условии



комплексной автоматизации. Работа фермы должна управляться единой ИТ-системой, получающей данные от всех элементов автоматизированного хозяйства и управляющей ее активными элементами — роботами и другими устройствами. Технология полной роботизации ферм востребована как в растениеводстве (тепличные хозяйства на гидропонике), так и в животноводстве (молочное скотоводство).

Первой в мире робофермой стало совместное предприятие Университета Харпера Адамса в Шропшире (Великобритания) и компании «Precision Decisions». Ферма, названная «HAND Free Nectare», позволила аграриям просто наблюдать за ростом агрокультур. Автономные модифицированные тракторы и дроны сами вырастили на территории 2,5 га 4,5 т ячменя. Люди автоматизировали все процессы — от посева семян до сбора урожая. Машинами управлял техперсонал из диспетчерской. Дроны со встроенными мультиспектральными датчиками осуществляли съемку угодий. Небольшие сельскохозяйственные машины брали образцы земли, оценивали ее состав и подбирали необходимые минеральные удобрения. Камеры в режиме реального времени оповещали о вредителях или сорняках [15].

Еще один проект — робоферма «Iron Ox» — занимает территорию бывшего торгового склада в Калифорнии площадью более 740 м², производительность фермы — до 26 тыс. кочанов зелени в год, что в пять раз больше, чем в традиционных хозяйствах такой площади (данные 2018 г.). Грядки с салатом-латуком размещаются в поддонах и пока подсвечиваются светодиодами. В будущем компания планирует применять естественное освещение. Именно поэтому модули в «Iron Ox» располагаются не вертикально, а горизонтально. На ферме, кроме людей, трудятся роботизированные руки и роботы-грузчики. Руки пересаживают растение с одного гидропонного контейнера в другой, как только латук подрастает и контейнер становится для него мал. Большие роботы-грузчики переносят контейнеры с водой массой в 362 кг.

Первое препятствие на пути создания полностью автоматизированной фермы — это налаживание совместной работы роботов. Различные роботы выполняют разные работы на ферме, но не взаимодействуют между собой в условиях производственной среды. В «Iron Ox» разработали софтвер «The Brain» для налаживания такой коллаборации на своей ферме. Программа мониторит содержание азота, температуру и местоположение роботов, а также управляет роботами и дает рекомендации людям, направляя их туда, где необходимо вмешательство [16].

Несмотря на то, что большинство действий на ферме автоматизировано, она пока не может обойтись без участия человека. Работники помогают в посеве и обработке растений, но в «Iron Ox» надеются автоматизировать и эти процессы.

Еще одна полностью роботизированная ферма по выращиванию салата-латука планируется к постройке в Киото. На робоферме «Овощная фабрика», как ожидается, будут собирать 30 тыс. кочанов салата в день. Весь производственный процесс организован без участия людей. Промышленные роботы будут сеять и поливать салат и срезать кочаны. Вмешательство человека потребуется только тогда, когда датчики, установленные в теплице, зафиксируют отклонения от производственного плана [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благоприятные перспективы внедрения БПЛА в сельское хозяйство объясняются их уникальной совместимостью с другими полезными технологиями, что упрощает и удешевляет переход к точному земледелию, которое оптимизирует использование ресурсов и расходных материалов.

Мировой рынок услуг на базе БПЛА начинает принимать очертания. Сервисные компании, оказывающие услуги по всему миру, внедряют дроны в различные процессы и предлагают их своим клиентам. Разработки в области искусственного интеллекта и специализированных сенсоров позволяют вывести применение дронов на новый уровень.

Проектирование и внедрение робоферм не только повышает эффективность сельского хозяйства и его доступность (в случае городских ферм), но также решает острый общемировой вопрос нехватки рабочей силы в агросекторе. Инновационные технологии ведения сельского хозяйства идеально подходят для культивирования молодых растений, выращивания зерновых культур и создания более здоровых продуктов питания без использования пестицидов. Однако пока есть проблемы в технологиях, которые не позволяют полностью заменить человека. Но с уверенностью можно утверждать, что вертикальное сельское хозяйство — это будущее аграрного бизнеса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шевченко А.В., Мещеряков Р.В., Мигачев А.Н. Обзор состояния мирового рынка робототехники для сельского хозяйства. Ч. 1. Беспилотная агротехника // Проблемы управления. — 2019. — № 5. — 3—18. [Shevchenko, A.V.,

- Meshcheryakov, R.V., Migachev, R.V.* Review of the world market of agriculture robotics. Part 1. Unmanned Vehicles for Agriculture // Control Sciences. — 2019. — No. 5. — P. 3—18. (In Russian)]
2. URL: <https://blog.dti.team/issledovanie—rynka—dronov/>
 3. URL: <https://iot.ru/selskoe-khozyaystvo/bpla-kak-osnova-zemledeliya-blizhayshego-budushchego>
 4. *Второй В.Ф., Второй С.Ф.* Перспективы экологического мониторинга сельскохозяйственных объектов с использованием беспилотных летательных аппаратов // Теоретический и научно-практический журнал ИАЭП. — 2017. — Вып. 92. — С. 158—166. [*Vtoryi, V.F., Vtoryi, S.V.* Prospects for environmental monitoring of agricultural facilities using unmanned aerial vehicles // Teoreticheskii i nauchno-prakticheskii zhurnal IAEP. — 2017. — Iss. 92. — P. 158—166. (In Russian)]
 5. *Федосеева Н.А., Загвоздкин М.В.* Перспективные области применения беспилотных летательных аппаратов // Научный журнал. — 2017. — № 9 (22). — С. 26—29. [*Fedosееva, N.A., Zagvozdkin, M.V.* Perspektivnye oblasti primeneniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov // Nauchnyi zhurnal. — 2017. — No. 9 (22). — S. 26—29. (In Russian)]
 6. URL: <https://4vision.ru/articles/kak-mozhno-ispolzovat-drony-dliya-razvitiya-skotovodstva-zarubezhnyj-opyt.html>
 7. *Афанасьев Р.А., Ермолов И.Л.* О перспективах роботизации точного земледелия // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2016. — Т. 17, № 12. — С. 828—833. [*Afanasyev, R.A., Ermolov, I.L.* Prospects for Robots in Precision Agriculture. — Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. — 2016. — Vol. 17, No. 12. — P. 828—833. (In Russian)]
 8. URL: <https://rg.ru/2016/07/26/kak-ispolzuiutsia-bespilotniki-v-selskom-hoziajstve.html>
 9. URL: <https://www.agroxxi.ru/selhoztehnika/novosti/japonskie-fermery-perehodjat-na-drony.html>
 10. *Бу Д.К., Нгуен В.В., Соленая О.А., Ронжин А.Л.* Анализ задач аграрной робототехники, решаемых посредством беспилотных летательных аппаратов // Агрофизика. — 2017. — № 3. — С. 57—65. [*Vu, D.Q., Nguyen, V.V., Solenaya, O.Ya., Ronzhin, A.L.* Analysis of agriculture robotics tasks solved by using unmanned aerial vehicles // Agrophysics. — 2017. — No. 3. — P. 57—65. (In Russian)]
 11. URL: <http://www.tadviser.ru/index.php>
 12. URL: <https://www.agroxxi.ru/selhoztehnika/novosti/drony-ne-zamenimy-dlja-provedeniya-biozaschity-polei.html>
 13. URL: <http://svetich.info/publikacii/tochnoe-zemledelie/opyt-i-perspektivy-primeneniya-bespilotn.html>
 14. URL: <https://sovzond.ru/press-center/news/selskoe-khozyaystvo/5271/>
 15. URL: <https://world.korupciya.com/2017/10/13/pervaya-vmire-roboferma-vyrastila-urozhay-bez-uchastiya-lyudey/>
 16. URL: <https://www.techcult.ru/robots/5864-pervaya-ferma-s-robotami-vmesto-lyudej>
 17. URL: <https://www.popmech.ru/technologies/news-365242-roboferma-bez-lyudey-otkroetsya-v-yaponii-uzhe-v-etom-godu/>
- Статья представлена к публикации членом редколлегии В.М. Вишневым.*
- Поступила в редакцию 8.03.2019, после доработки 6.05.2019.
Принята к публикации 30.05.2019.*
- Шевченко Анна Владимировна** — ✉ nushech25@gmail.com,
Мещеряков Роман Валерьевич — д-р техн. наук, ✉ mrw@ipu.ru,
Мигачев Андрей Николаевич — ✉ batwus@gmail.com,
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва.

REVIEW OF THE WORLD MARKET OF AGRICULTURE ROBOTICS.

Part 1. Unmanned Vehicles for Agriculture

A.V. Shevchenko[#], R.V. Meshcheryakov, A.N. Migachev

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[#]✉ nushech25@gmail.com

Abstract. The overview is presented of the world market of unmanned aerial vehicles (UAVs) in terms of their use in agriculture. The main tasks of agriculture are described that can be solved by using the UAVs. Conclusions are made about the advantage of the UAVs when compared to satellites and small aircraft. The developments of the main players of the UAV market are given with brief description of the technical characteristics of the vehicles and the technologies of their work. The world experience of the use of UAVs in cattle breeding, plant growing (including that in pest control and chemical applications) is presented. The main advantages and prospects of using UAVs in agriculture are highlighted. The overview is given of such an area of robotics as the robotic farming. The technologies of full robotization of farms are described and existing global projects of urban farms and robo-farms are presented for consideration. The advantages and disadvantages of these technologies are considered. Conclusions are made about the effectiveness and the promises of the introduction of UAV technologies and robo-farming in agriculture.

Keywords: UAV, robo-farm, agriculture, robotics market.

СИНТЕЗ ОДНОМЕРНЫХ ДИСКРЕТНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ПО ИНЖЕНЕРНЫМ КРИТЕРИЯМ КАЧЕСТВА НА ОСНОВЕ МОДАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

В.Н. Честнов, В.А. Александров, И.Г. Резков

Аннотация. Рассмотрен линейный дискретный минимально-фазовый объект с одним управляющим входом, одним измеряемым выходом и неизмеряемым внешним возмущением. Поставлена задача синтеза дискретного регулятора по выходу, обеспечивающего заданные инженерные показатели качества: ошибку регулирования, время регулирования, радиус запасов устойчивости. Получены аналитические формулы, позволяющие связать инженерные показатели качества с желаемыми корнями характеристического полинома замкнутой системы в задаче модального управления при выборе вещественных неотрицательных корней. При этом заданные ошибка и время регулирования приводят к ограничениям максимального по модулю значения желаемых корней, в то время как значения желаемых корней, обеспечивающие заданный радиус запасов устойчивости, могут не удовлетворять этим ограничениям, и заданные значения показателей качества должны быть пересмотрены. Приведены примеры, иллюстрирующие эффективность предлагаемого подхода.

Ключевые слова: линейная дискретная система, модальное управление, ошибка регулирования, время регулирования, радиус запасов устойчивости.

ВВЕДЕНИЕ

Частотные методы синтеза классической теории управления целиком базируются на инженерных показателях качества, которые напрямую используются при построении регулятора [1, 2]. Среди этих показателей ошибка регулирования (при действии ограниченного внешнего возмущения) характеризует точность, время регулирования определяет быстродействие, а запасы устойчивости по фазе и модулю характеризуют робастность замкнутой системы. Эти показатели, положенные в основу проектирования систем управления, показали свою непревзойденную практическую эффективность на протяжении последних 70 лет.

Вместе с тем современные техники синтеза регуляторов H_2 , H_∞ , $L_1(I_1)$, μ -синтез [3–5], а также методы модального управления по выходу, как правило, учитывают лишь отдельные показатели качества либо не учитывают их вовсе. В частности, пренебрежение к требованиям робастности в этих современных техниках приводит к регуляторам по

выходу, которые невозможно применить на практике из-за недопустимо малых запасов устойчивости [6]. Такое явление невозможно, если непрерывный регулятор строить по полному вектору состояния на основе техники LQ - или H_∞ -оптимизации, а запасы устойчивости оценивать на физическом входе объекта [7–9].

Вопросы точности и запасов устойчивости сначала для регуляторов по полному вектору состояния, а затем для регуляторов по выходу начал изучать А.Г. Александров [8, 9]. Для более полной характеристики запаса устойчивости по годографу Найквиста разомкнутой системы в 1980 г. им введено понятие радиуса запасов устойчивости, которое определяет минимальное расстояние годографа от критической точки $(-1, j0)$ [10]. Это понятие названо запасом устойчивости в работе [11]. Радиус запасов устойчивости — это более адекватная характеристика робастности, нежели запасы по фазе и модулю [9, 11], и во многом определяет возможность реализации регулятора в инженерной практике.

В работе [12] строились непрерывные регуляторы по заданному радиусу запасов устойчивости путем минимизации H_∞ -нормы матрицы чувствительности. Точность многомерных систем с непрерывным регулятором по измеряемому выходу при действии полигармонических внешних возмущений, ограниченных по мощности с неизвестными амплитудами и частотами, но известным числом частот, изучалась в работах [13, 14]. Непрерывные H_∞ -регуляторы, обеспечивающие заданную точность и радиус запасов устойчивости получены в работе [15]. Непрерывные H_∞ -регуляторы, обеспечивающие заданные радиус запасов устойчивости на входе/выходе объекта и степень устойчивости, определяющую желаемое время регулирования, получены в работе [16].

Дискретный случай синтеза регуляторов по измеряемому выходу осложняется следующими важными фактами.

- Даже регуляторы по полному вектору состояния, вообще говоря, не обеспечивают приемлемый на практике радиус запасов устойчивости. Это заведомо возможно только для устойчивых объектов [17–19].
- Достижимая ошибка регулирования для дискретных регуляторов по полному вектору состояния, и тем более по выходу, ограничена снизу некоторой предельной величиной, меньше которой не может обеспечить никакой линейный регулятор [20], в частности, для гармонических неизменяемых внешних возмущений неизвестной частоты.
- Для линейных дискретных регуляторов по выходу достижимое время регулирования $t_s \geq n_c h$, где n_c — порядок замкнутой системы и h — период дискретности. Этот факт хорошо известен. Менее известен тот факт, что даже в непрерывном случае быстродействие системы ограничено абсолютным значением вещественной части нуля объекта, ближайшего к мнимой оси (даже для минимально-фазовых объектов!) [11]. При этом увеличение степени устойчивости (определяющей время регулирования) приводит к катастрофическому уменьшению радиуса запасов устойчивости [11, 16, 21], что не приемлемо на практике. Аналогичное явление имеет место и в дискретном случае [22].

В работах [23–26] рассмотрены вопросы выбора корней желаемого характеристического полинома замкнутой системы в задаче модального управления по заданному радиусу запасов устойчивости для непрерывных систем. Кроме того, в работах [25, 26] предложен метод выбора этих корней с учетом заданной точности при действии неизменяемых ограниченных внешних возмущений.

Настоящая работа посвящена проблеме синтеза дискретных регуляторов для объектов с одним входом и одним выходом по заданным инженерным критериям качества: ошибке регулирования, времени регулирования и радиусу запасов устойчивости на основе метода модального управления. Модальный подход к решению этой проблемы позволяет глубже понять взаимосвязь и противоречивость этих требований качества управления, особенно для одномерных объектов.

В настоящей работе решается задача стабилизации при действии неизвестного ограниченного внешнего возмущения. Задача слежения [27–30] здесь не рассматривается. Вместе с тем вопрос выбора корней желаемого характеристического полинома в задаче модального управления, обеспечивающего запасы устойчивости в дискретном случае, остается актуальным и для следящих систем. Поэтому полученные в работе результаты могут использоваться и при решении задачи слежения, что показано в одном из примеров.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим дискретный линейный объект с одним входом и одним выходом, описываемый разностным уравнением:

$$\begin{aligned} y(k+n) + a_{n-1}y(k+n-1) + \dots + a_0y(k) = \\ = b_{n-1}u(k+n-1) + \dots + b_0u(k) + \\ + g_{n-1}f(k+n-1) + \dots + g_0f(k), \\ k = 0, 1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (1)$$

где n — порядок объекта, $y(k)$ — измеряемый и одновременно регулируемый выход объекта в дискретные моменты времени $t = kh$ (где h — период дискретности), $u(k)$ — управляющее воздействие, $f(k)$ — неизменяемое внешнее возмущение, a_i, b_i, g_i ($i = 0, \dots, n-1$) — известные коэффициенты разностного уравнения.

Возмущение — ограниченный полигармонический сигнал [31]

$$f(k) = \sum_{i=1}^{\infty} f_i \sin(\omega_i h k + \varphi_i), \quad f_i \geq 0, \quad \sum_{i=1}^{\infty} f_i \leq f^*, \quad (2)$$

где амплитуды f_i , частоты ω_i и фазы φ_i неизвестны, а сумма амплитуд f_i ограничена известным значением f^* .

Задача: найти линейный регулятор по выходу

$$\begin{aligned} c_m u(k+m) + \dots + c_0 u(k) = \\ = -d_m y(k+m) - \dots - d_0 y(k), \end{aligned} \quad (3)$$

где $m \geq n-1$, такой, чтобы замкнутая система (1), (3) удовлетворяла заданным инженерным критериям качества:

— ошибка регулирования должна быть не более заданной:

$$\sup_{k \geq k_s} |y(k)| \leq y^*, \quad (4)$$

где $y^* > 0$ — желаемая ошибка регулирования, k_s — номер такта, соответствующий времени окончания переходных процессов (времени регулирования t_p);

— время регулирования $t_p = k_s h$ не должно превышать значения $t_p^* = k_s^* h$, где k_s^* — заданное значение: $k_s \leq k_s^*$;

— радиус запасов устойчивости не менее заданного значения r ($0 < r < 1$). Обычно требуется значение $r > 0,5$.

Радиус запасов устойчивости — это максимальный радиус круга с центром в критической точке $(-1, j0)$, который не пересекает годограф Найквиста разомкнутой системы (1), (3) [9—11], как показано на рис. 1.

Переходя к Z -преобразованию, запишем дискретные передаточные функции объекта по управлению и по возмущению

$$W_u(z) = \frac{b(z)}{a(z)} = \frac{b_{n-1}z^{n-1} + \dots + b_0}{z^n + a_{n-1}z^{n-1} + \dots + a_0},$$

$$W_f(z) = \frac{g(z)}{a(z)} = \frac{g_{n-1}z^{n-1} + \dots + g_0}{z^n + a_{n-1}z^{n-1} + \dots + a_0}, \quad (5)$$

где z — комплексная переменная Z -преобразования. Передаточная функция регулятора

$$W_p(z) = -\frac{d(z)}{c(z)} = -\frac{d_m z^m + \dots + d_0}{c_m z^m + \dots + c_0},$$

и передаточная функция разомкнутой системы

$$W(z) = -W_u(z)W_p(z) = \frac{b(z)d(z)}{a(z)c(z)}. \quad (6)$$

Кроме того, полагая $z = e^{j\omega h}$, $0 \leq \omega \leq \pi/h$, будем рассматривать частотные передаточные функции.

Тогда система (1), (3) будет обладать радиусом запасов устойчивости r , если [22]:

$$|1 + W(e^{j\omega h})| \geq r, \quad 0 \leq \omega \leq \pi/h. \quad (7)$$

Метод модального управления [27—29] состоит в том, что коэффициенты регулятора (3) c_i , d_i , $i = 0, \dots, m$, находятся как решение системы линейных алгебраических уравнений, полученной приравнением коэффициентов при одинаковых степенях уравнения

$$a(z)c(z) + b(z)d(z) = \delta(z), \quad (8)$$

где слева характеристический полином замкнутой системы (1), (3), а справа желаемый полином сте-

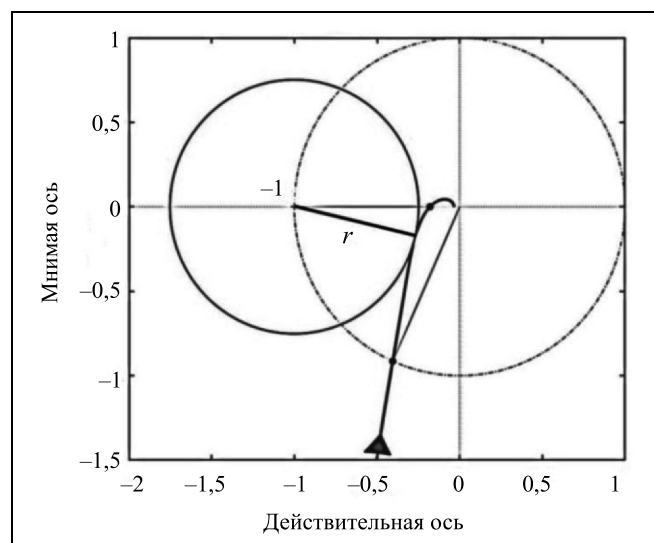


Рис. 1. Годограф Найквиста разомкнутой системы и радиус запасов устойчивости

пени $n + m$. Тогда Задача сводится к тому, чтобы сформировать полином $\delta(z)$ такой, чтобы коэффициенты регулятора c_i , d_i , $i = 0, \dots, m$, полученные из решения уравнения (8), обеспечивали выполнение заданных инженерных критериев качества.

В настоящей статье рассматривается объект управления, у которого полином числителя $b(z)$ передаточной функции (5) устойчивый (все его корни находятся внутри единичного круга), и его порядок равен $n - 1$.

В этом случае полином числителя $b(z)$ может быть включен в желаемый характеристический полином замкнутой системы [27, 29]: $\delta(z) = b(z)\delta_0(z)$, где $\delta_0(z)$ — полином степени n , в котором коэффициент при старшей степени равен коэффициенту при старшей степени полинома знаменателя передаточной функции объекта $a(z)$. Тогда из уравнения (8) получим полиномы передаточной функции регулятора:

$$c(z) = b(z), \quad d(z) = \delta_0(z) - a(z). \quad (9)$$

Для непрерывных систем такое условие использовано в работе [25].

Известно [27, 28], что включение полинома $b(z)$ в характеристический полином замкнутой системы может приводить к длительным и колебательным переходным процессам по управляемому воздействию или по другим переменным состояния объекта.

2. ОШИБКА РЕГУЛИРОВАНИЯ

Замкнутая система (1), (3) устойчива и линейна, поэтому выход системы при действии возму-

шения вида (2) после окончания переходных процессов имеет вид [30, 32]

$$y(k) = \sum_{i=1}^{\infty} y_i \sin(\omega_i h k + \theta_i), \quad y_i \geq 0,$$

где $y_i = |W_{yf}(e^{j\omega_i h})| f_i$; $W_{yf}(e^{j\omega h})$ — частотная передаточная функция замкнутой системы по возмущению. Тогда для выполнения требования к точности (4) можно записать

$$\begin{aligned} |y(k)| &\leq \sum_{i=1}^{\infty} |y_i \sin(\omega_i h k + \theta_i)| \leq \sum_{i=1}^{\infty} y_i = \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} |W_{yf}(e^{j\omega_i h})| f_i \leq \sup_{0 \leq \omega \leq \pi/h} |W_{yf}(e^{j\omega h})| \sum_{i=1}^{\infty} f_i \leq \\ &\leq f^* \sup_{0 \leq \omega \leq \pi/h} |W_{yf}(e^{j\omega h})| \leq y^*, \quad k \geq k_s. \end{aligned}$$

Отсюда очевидно достаточное условие

$$\sup_{0 \leq \omega \leq \pi/h} |W_{yf}(e^{j\omega h})| \leq y^*/f^*. \quad (10)$$

Таким образом, если получен регулятор, обеспечивающий выполнение условия (10), то при возмущении (2) будет выполняться требование к точности регулирования (4).

Передаточная функция замкнутой системы (1), (3) по возмущению имеет вид:

$$W_{yf}(z) = \frac{g(z)c(z)}{a(z)c(z) + b(z)d(z)} = \frac{g(z)c(z)}{\delta(z)}. \quad (11)$$

Для регулятора (9) из формулы (11) получим

$$W_{yf}(z) = \frac{g(z)}{\delta_0(z)}. \quad (12)$$

Таким образом, передаточная функция $W_{yf}(z)$ зависит только от известного полинома объекта $g(z)$ и от полинома $\delta_0(z)$, который необходимо оп-ределить так, чтобы выполнялось условие (10).

Желаемый полином $\delta_0(z)$ будем выбирать так:

$$\delta_0(z) = \prod_{i=1}^n (z - \lambda_i), \quad (13)$$

где его корни $0 \leq \lambda_i < 1$, $i = 1, \dots, n$, — вещественные, неотрицательные и меньше единицы. Тогда из выражений (10), (12) и (13) получаем

$$\sup_{0 \leq \omega \leq \pi/h} \left| \frac{g(e^{j\omega h})}{\prod_{i=1}^n (e^{j\omega h} - \lambda_i)} \right| \leq y^*/f^*. \quad (14)$$

Из работы [20] следует, что последнее неравенство не всегда может быть выполнено.

Достаточным условием его выполнения будет

$$\frac{\sup_{0 \leq \omega \leq \pi/h} |g(e^{j\omega h})|}{\inf_{0 \leq \omega \leq \pi/h} \left| \prod_{i=1}^n (e^{j\omega h} - \lambda_i) \right|} \leq y^*/f^*.$$

Учитывая, что для $0 \leq \lambda_i < 1$, $i = 1, \dots, n$, минимум в знаменателе левой части этого неравенства достигается при $\omega = 0$,

$$\inf_{0 \leq \omega \leq \pi/h} \left| \prod_{i=1}^n (e^{j\omega h} - \lambda_i) \right| = \prod_{i=1}^n (1 - \lambda_i),$$

получаем, что неравенство (14) выполняется, если

$$\prod_{i=1}^n (1 - \lambda_i) \geq \frac{f^*}{y^*} \cdot \sup_{0 \leq \omega \leq \pi/h} |g(e^{j\omega h})|. \quad (15)$$

Заметим, что так как при $0 \leq \lambda_i < 1$, $i = 1, \dots, n$,

$$\prod_{i=1}^n (1 - \lambda_i) < 1,$$

то не для любых значений y^* , f^* и $\sup_{0 \leq \omega \leq \pi/h} |g(e^{j\omega h})|$ можно найти такие значения λ_i , $i = 1, \dots, n$, чтобы условие (15) было выполнено.

Для большей формализации правил выбора значений корней желаемого характеристического полинома замкнутой системы можно из неравенства (15) получить ограничение для максимального значения. Так как

$$\prod_{i=1}^n (1 - \lambda_i) \geq (1 - \lambda_{\max})^n, \quad \lambda_{\max} = \max_{i=1, \dots, n} \lambda_i,$$

то достаточным условием выполнения неравенства (14) будет

$$(1 - \lambda_{\max})^n \geq \frac{f^*}{y^*} \cdot \sup_{0 \leq \omega \leq \pi/h} |g(e^{j\omega h})|,$$

из которого следует ограничение максимального значения корней желаемого характеристического полинома замкнутой системы:

$$\lambda_{\max} \leq 1 - \sqrt[n]{\frac{f^*}{y^*} \cdot \sup_{0 \leq \omega \leq \pi/h} |g(e^{j\omega h})|}. \quad (16)$$

Условие $0 \leq \lambda_{\max} < 1$ налагает ограничение на подкоренное выражение:

$$\frac{f^*}{y^*} \cdot \sup_{0 \leq \omega \leq \pi/h} |g(e^{j\omega h})| < 1,$$

которое означает, что значение желаемой ошибки регулирования должно удовлетворять условию:

$$y^* > f^* \cdot \sup_{0 \leq \omega \leq \pi/h} |g(e^{j\omega h})|.$$



Это условие отличается от полученной в работе [20] предельной достижимой точности линейных систем с дискретным регулятором для гармонического внешнего возмущения

$$|y| > f^* \frac{|g(e^{j\omega h})|}{2^n}$$

только тем, что принятое ограничение $0 \leq \lambda_i < 1$, а не ограничение $-1 < \lambda_i < 1$, приводит к тому, что нет деления на 2^n , и рассмотрение возмущения вида (2), а не одной частоты, добавляет поиск верхней границы для $0 \leq \omega \leq \pi/h$.

Итак, модальный регулятор (3), найденный так, что корни желаемого полинома (13) удовлетворяют условию (16), обеспечивает требование Задачи к ограничению ошибки регулирования (4).

В частном случае, если о возмущении известно, что в нем преобладают низкочастотные составляющие, то целесообразно добавить интегральную составляющую в регулятор и таким образом получить астатическую систему [27]. Тогда регулятор можно получить как

$$c(z) = b(z)(z - 1), \quad d(z) = \delta_1(z) - a(z),$$

где $\delta_1(z) = \delta_0(z)(z - \lambda_{n+1})$, $0 \leq \lambda_{n+1} \leq \lambda_{\max}$.

В этом случае частотная передаточная функция по возмущению

$$W_{yf}(e^{j\omega h}) = \frac{g(e^{j\omega h})(e^{j\omega h} - 1)}{\delta_1(e^{j\omega h})}$$

будет равна 0 для $\omega = 0$ и близка к 0 при $\omega h \ll 1$, поскольку

$$e^{j\omega h} = \cos \omega h + j \sin \omega h \approx 1 + j\omega h$$

и

$$|W_{yf}(e^{j\omega h})| \approx \left| \frac{g(e^{j\omega h})}{\delta_1(e^{j\omega h})} \right| \omega h.$$

Это означает, что частотная передаточная функция по возмущению фактически уменьшается по сравнению с передаточной функцией (12) в $1/\omega h$ раз, что при $\omega h \ll 1$ весьма существенно для низкочастотных возмущений.

3. ВРЕМЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Известна [32] грубая оценка времени регулирования, определяемого простыми полюсами замкнутой системы с максимальным модулем, что в нашем случае даст:

$$t_s = k_s h = -\frac{3h}{\ln \lambda_{\max}} = \frac{3h}{\ln \lambda_{\max}^{-1}}, \quad \lambda_{\max} = \max_{i=1, \dots, n} |\lambda_i|,$$

где λ_i — корни полинома $\delta_0(z)$, а значение 3 в числителе соответствует оценке времени регулирования, когда измеряемый выход отличается от установившегося значения не более чем на 5 %, что широко применяется на практике.

Тогда желаемое значение k_s^* приводит к требованию:

$$\lambda_{\max} \leq e^{-3/k_s^*}. \quad (17)$$

Следует учитывать, что это требование основано на грубой оценке, принимающей в расчет только максимальную постоянную времени замкнутой системы. Поэтому нужно проверять, что в замкнутой системе с регулятором, найденным по формулам (9), при условии (17), действительно выполняется требование к времени регулирования. Если оно не выполняется, то нужно соответственно уменьшить значение $\lambda_{\max}$.

Таким образом, заданные ошибка и время регулирования дают ограничения на $\lambda_{\max}$, определяемые соотношениями (16) и (17), меньшее из которых $\lambda_{\max}^*$ и устанавливает максимальное значение модулей выбираемых корней характеристического полинома замкнутой системы.

Заметим, что при наличии задающего сигнала передаточная функция замкнутой системы (1), (3) по задающему воздействию имеет вид:

$$W_3(z) = \frac{b(z)d(z)}{a(z)c(z) + b(z)d(z)} = \frac{b(z)d(z)}{\delta(z)},$$

которая для регулятора (9), когда $\delta(z) = b(z)\delta_0(z)$, принимает вид

$$W_3(z) = \frac{d(z)}{\delta_0(z)},$$

т. е. знаменатель этой передаточной функции — тот же полином $\delta_0(z)$, что и в функции (12).

4. РАДИУС ЗАПАСОВ УСТОЙЧИВОСТИ

Преобразуем условие (7) с учетом выражений (6) и (8):

$$\left| \frac{\delta(e^{j\omega h})}{a(e^{j\omega h})c(e^{j\omega h})} \right| \geq r, \quad 0 \leq \omega \leq \pi/h. \quad (18)$$

Если регулятор построен по формулам (9), то из неравенства (18) приходим к неравенству

$$\left| \frac{\delta_0(e^{j\omega h})}{a(e^{j\omega h})} \right| \geq r, \quad 0 \leq \omega \leq \pi/h. \quad (19)$$

Заметим, что в неравенстве (19) нет полиномов регулятора, т. е. выполнение этого условия зависит только от известного полинома объекта $a(z)$ и от полинома $\delta_0(z)$, который необходимо определить. Нужно помнить, что полиномы $a(z)$ и $\delta_0(z)$ имеют одинаковый порядок, и коэффициенты при старших степенях этих полиномов равны. Поэтому добиться выполнения условия (19) можно только выбором корней полинома $\delta_0(z)$, которые из условия устойчивости замкнутой системы должны быть по модулю меньше 1.

В случае, если все полюса объекта вещественны, можно записать

$$a(e^{j\omega h}) = \prod_{i=1}^n (e^{j\omega h} - z_i), \quad 0 \leq \omega \leq \pi/h,$$

где $z_i, i = 1, \dots, n$ — корни полинома $a(z)$. Тогда, учитывая выражение (13), условие (19) можно представить как

$$\left| \prod_{i=1}^n \frac{(e^{j\omega h} - \lambda_i)}{(e^{j\omega h} - z_i)} \right| \geq r, \quad 0 \leq \omega \leq \pi/h. \quad (20)$$

Для выполнения условия (20) достаточно выполнение подобного условия для каждого сомножителя отдельно:

$$\left| \frac{(e^{j\omega h} - \lambda_i)}{(e^{j\omega h} - z_i)} \right| \geq r_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad 0 \leq \omega \leq \pi/h, \quad (21)$$

где $r_i, i = 1, \dots, n$, выбираются такие, что

$$\prod_{i=1}^n r_i = r. \quad (22)$$

Неравенства (21) выполняются, если

$$\min_{0 \leq \omega \leq \pi/h} \left| \frac{(e^{j\omega h} - \lambda_i)}{(e^{j\omega h} - z_i)} \right| = r_i. \quad (23)$$

Значения модулей можно определить как

$$\begin{aligned} \left| \frac{(e^{j\omega h} - \lambda_i)}{(e^{j\omega h} - z_i)} \right| &= \left| \frac{(\cos \omega h + j \sin \omega h - \lambda_i)}{(\cos \omega h + j \sin \omega h - z_i)} \right| = \\ &= \frac{\sqrt{(\cos \omega h - \lambda_i)^2 + \sin^2 \omega h}}{\sqrt{(\cos \omega h - z_i)^2 + \sin^2 \omega h}} = \\ &= \frac{\sqrt{\lambda_i^2 + 1 - 2\lambda_i \cos \omega h}}{\sqrt{z_i^2 + 1 - 2z_i \cos \omega h}}. \end{aligned} \quad (24)$$

Минимумы могут быть на границах интервала $0 \leq \omega \leq \pi/h$ или при таких значениях ω , где производная по ω полученного выражения (24) равна 0. Так как корень квадратный — монотонная функ-

ция, то для нахождения экстремумов выражения (24), достаточно найти нули производной подкоренного выражения, которая имеет вид

$$\psi(\omega) = \frac{2h \sin \omega h (z_i - \lambda_i)(\lambda_i z_i - 1)}{(z_i^2 + 1 - 2z_i \cos \omega h)^2}. \quad (25)$$

Рассмотрим варианты полюсов объекта.

Устойчивый объект, $0 \leq z_i < 1, i = 1, \dots, n$. Будем выбирать значения $\lambda_i, i = 1, \dots, n$, такие, что $0 \leq \lambda_i \leq z_i$. Тогда сомножитель числителя производной (25) $(\lambda_i z_i - 1)$ всегда меньше 0, а сомножитель $(z_i - \lambda_i)$ больше или равен 0. Сомножитель $\sin \omega h = 0$ при $\omega = 0$ и $\omega = \pi/h$, а для остальных значений $0 < \omega < \pi/h$ выполняется $\sin \omega h > 0$. Таким образом, если $\lambda_i = z_i$, то $\left| \frac{(e^{j\omega h} - \lambda_i)}{(e^{j\omega h} - z_i)} \right| = 1$, а если $0 \leq \lambda_i < z_i$, то производная $\psi(\omega) < 0$ для $0 < \omega < \pi/h$ и, следовательно, минимум значения (24) будет при $\omega = \pi/h$. Для $\omega = \pi/h$ получаем

$$\left| \frac{(e^{j\frac{\pi}{h}h} - \lambda_i)}{(e^{j\frac{\pi}{h}h} - z_i)} \right| = \left| \frac{-1 - \lambda_i}{-1 - z_i} \right| = \frac{\lambda_i + 1}{z_i + 1},$$

т. е. условие (23) в этом случае имеет вид

$$\frac{\lambda_i + 1}{z_i + 1} = r_i, \quad (26)$$

и теперь у нас есть формула для получения значений $\lambda_i, i = 1, \dots, n$:

$$\lambda_i = r_i(z_i + 1) - 1, \quad (27)$$

где r_i выбрано из условия (22), и кроме того, для получения значения $0 \leq \lambda_i < 1$ по формуле (27) значение r_i должно удовлетворять условию

$$\frac{1}{(z_i + 1)} \leq r_i < \frac{2}{(z_i + 1)}. \quad (28)$$

Если для каких-то λ_i допустить, что $\lambda_i > z_i$, то производная $\psi(\omega)$ будет положительна для $0 < \omega < \pi/h$ и, следовательно, минимум значения модулей (24) будет при $\omega = 0$. Тогда вместо условия (26) получаем

$$\frac{1 - \lambda_i}{1 - z_i} = r_i$$

и значение λ_i определяется как

$$\lambda_i = 1 - r_i(1 - z_i), \quad (29)$$

где, учитывая соотношение $\lambda_i > z_i$, должно выполняться

$$0 < r_i < 1. \quad (30)$$



Суммируя изложенное, сформулируем рекомендации для определения корней полинома $\delta_0(z)$ для объектов с вещественными неотрицательными полюсами:

— выделить «быстрые» устойчивые полюса объекта $z_i \ll \lambda_{\max}^*$, $i = 1, \dots, l$, $l < n$, для которых принять $\lambda_i = z_i$;

— остальные значения λ_i , $i = l + 1, \dots, n$, получить из формулы (27), приняв, $r_i = n^{-1} \sqrt{r}$, например;

— проверить, что выполняется неравенство $\lambda_i < \lambda_{\max}^*$, а если не выполняется, то подбирать другие значения r_i , соблюдая условие (22).

Неустойчивый объект, $z_i \geq 1$ (для некоторых i). В этом случае производная (25) остается отрицательной для $0 < \omega < \pi/h$ при выполнении условия $\lambda_i < 1/z_i$ и λ_i также определяются по формуле (27). Но учитывая соотношение $\lambda_i < 1/z_i$, вместо условия (28) будет ограничение

$$\frac{1}{(z_i + 1)} \leq r_i < \frac{1}{z_i}.$$

Из выражения (24) видно, что выбор $\lambda_i = 1/z_i$ дает значение

$$\left| \frac{(e^{j\omega h} - \lambda_i)}{(e^{j\omega h} - z_i)} \right| = \frac{1}{z_i} = r_i.$$

При $\lambda_i > 1/z_i$ производная (25) будет положительна для $0 < \omega < \pi/h$, и минимум значения выражения (24) будет при $\omega = 0$. Для $z_i > 1$ получаем

$$\frac{1 - \lambda_i}{z_i - 1} = r_i,$$

и значение λ_i определяется как $\lambda_i = 1 - r_i(z_i - 1)$, где для выполнения соотношения $\lambda_i > 1/z_i$ значение r_i можно выбирать из диапазона $0 < r_i < 1/z_i$.

Нужно учитывать, что при больших значениях неустойчивых полюсов объекта z_i выбор значений r_i ограничивается малым числом $1/z_i$, что может не позволить выполнить требование (22), и, следовательно, не любой желаемый радиус запасов устойчивости может быть получен, как уже было показано [23].

Объект с отрицательным значением полюса, $z_i < 0$. Заметим, что при дискретизации непрерывных объектов такие значения не могут получаться [32]. В этом случае производная (25) будет положительна для $0 < \omega < \pi/h$, и минимум значения (24) будет при $\omega = 0$. Тогда значения λ_i можно опреде-

лять по формуле (29), но вместо условия (30) значение r_i можно выбирать из диапазона

$$0 < r_i < \frac{1}{(1 - z_i)}.$$

В этом случае значение r_i может быть ограничено малым числом, т. е. не любой желаемый радиус запасов устойчивости может быть получен.

Случай объекта с комплексно-сопряженными полюсами требует отдельного рассмотрения.

5. ПРИМЕРЫ

5.1. Управление мотоциклом

Рулевое управление движением мотоцикла можно описать упрощенной линейной моделью [11]:

$$y = \frac{as + 1}{s^2} (u + f),$$

где y — это курсовой угол (в градусах), u — угол поворота руля (в градусах). Значение коэффициента a , соответствующее положению центра масс относительно задней оси, примем равным 0,5. Для периода дискретности $h = 0,1$ с получим эквивалентную дискретную модель объекта [27, 29, 32]:

$$W_u(z) = \frac{0,055(z - 0,8182)}{(z - 1)^2}. \quad (31)$$

Пусть желаемый радиус запасов устойчивости $r = 0,75$, желаемое время регулирования $t_p^* = 1$ с и ошибка регулирования при возмущении (2), для которого $f^* = 10$, должна быть не более $y^* = 1$.

Максимальное значение корней характеристического полинома, определенное по формуле (16), исходя из допустимой ошибки регулирования, для исходных данных этого примера получилось равным 0. Такие значения корней не обеспечат желаемого радиуса запасов устойчивости. В этом случае после нахождения регулятора по заданному времени регулирования и радиусу запасов устойчивости определим достижимую ошибку регулирования.

Максимальное значение корней характеристического полинома исходя из желаемого времени регулирования, определенное по формуле (17): $\lambda_{\max} = 0,7408$.

Для объекта второго порядка (31) необходимо разделить два корня полинома второго порядка $\delta_0(z)$. Примем $\lambda_1 = \lambda_{\max} = 0,7408$. Тогда по формуле (27)

$$r_1 = \frac{\lambda_1 + 1}{z_1 + 1} = \frac{1,7408}{2} = 0,8704.$$

Определим $r_2 = r/r_1 = 0,8617$ и получим по формуле (27) значение $\lambda_2 = 0,7233$.

Возвращаясь к вопросу ошибки регулирования, заметим, что условие (16) — это достаточное, но не необходимое условие выполнения условия (14). Поэтому проверим значение ошибки регулирования для исходных

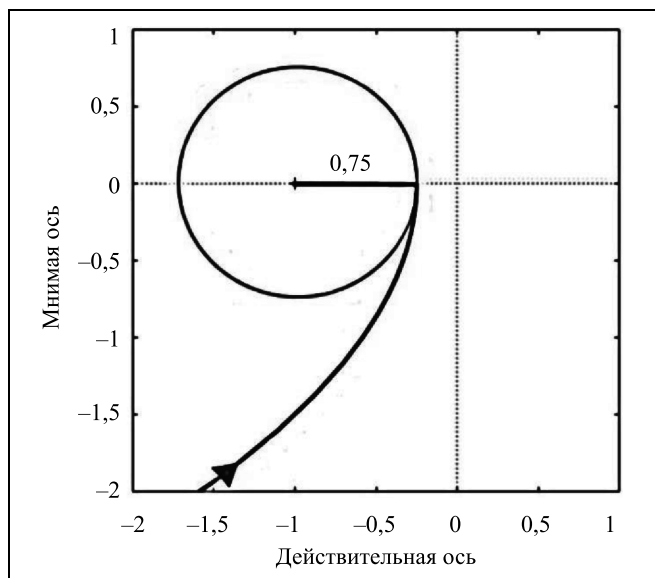


Рис. 2. Годограф Найквиста разомкнутой системы (31), (32)

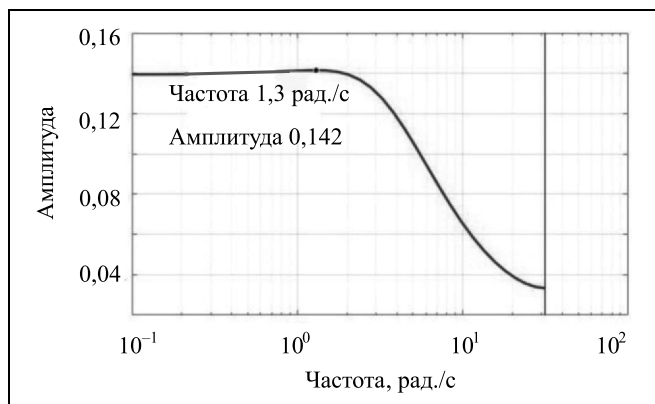


Рис. 3. Амплитудная частотная характеристика замкнутой системы (31), (32)

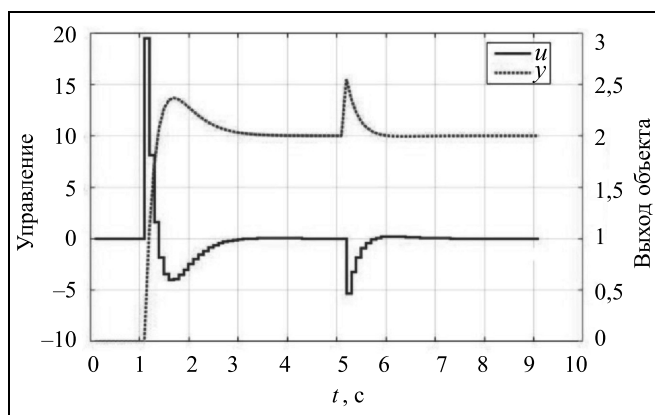


Рис. 4. Переходные процессы в замкнутой системе (31), (32)

данных этого примера и полученных корней характеристического полинома λ_1, λ_2 по формуле, выведенной из выражения (14):

$$y^* = f^* \sup_{0 \leq \omega \leq \pi/h} \left| \frac{g(e^{j\omega h})}{\prod_{i=1}^n (e^{j\omega h} - \lambda_i)} \right| = 1,42,$$

что будем считать приемлемым результатом.

Тогда формируем полином

$$\delta_0(z) = (z - 0,7408)(z - 0,7233),$$

и получаем по формулам (9) полиномы передаточной функции регулятора

$$c(z) = 0,055z - 0,045, d(z) = 0,5359z - 0,4641. \quad (32)$$

В соответствии с формулой (3) получаем дискретный регулятор:

$$u(k) = -9,744y(k) + 8,438y(k-1) + 0,8182u(k-1).$$

Годограф Найквиста разомкнутой системы (31), (32) показан на рис. 2, где видно, что радиус запасов устойчивости равен заданному значению 0,75. Амплитудная частотная характеристика замкнутой системы (31), (32) по возмущению $|W_{yf}(e^{j\omega h})|$ показана на рис. 3. Переходный процесс в замкнутой системе (31), (32) при изменении уставки с 0 на 2,0 в момент времени $t = 0$ и при импульсном возмущении (физический смысл импульсного возмущения — это, например, неровности дороги, приводящие к изменению направления движения) $f = 10$ в момент времени $t = 5,0$ показан на рис. 4.

На рис. 4 видно, что при изменении уставки на 2° управление достигает значения, близкого к 20, что в трактовке реального процесса управления выглядит чрезмерным, а кроме того приводит к перерегулированию. Очевидно, что задачу рулевого управления лучше формулировать как следящую систему с регулятором [27] вида

$$c_m u(k+m) + \dots + c_0 u(k) = q_m y_{sp}(k+m) + \dots + q_0 y_{sp}(k) - d_m y(k+m) - \dots - d_0 y(k), \quad (33)$$

который в случае выбора $q(z) = d(z)$ не отличается от регулятора (3), но в ином случае позволяет формировать динамику системы относительно уставки $y_{sp}(k)$. Так, если задана желаемая передаточная функция замкнутой системы

$$W_{ж}(z) = \frac{b_0(z)}{a_0(z)},$$

то, как показано в работе [27], она будет реализована в замкнутой системе, если полином

$$q(z) = \frac{b_0(z)\delta(z)}{a_0(z)b(z)}. \quad (34)$$

Пусть для рассматриваемого примера желаемая передаточная функция замкнутой системы сформирована, исходя из желаемого времени регулирования:

$$W_{ж}(z) = \frac{1 - \lambda_{\max}}{z - \lambda_{\max}} = \frac{0,2592}{z - 0,7408}.$$

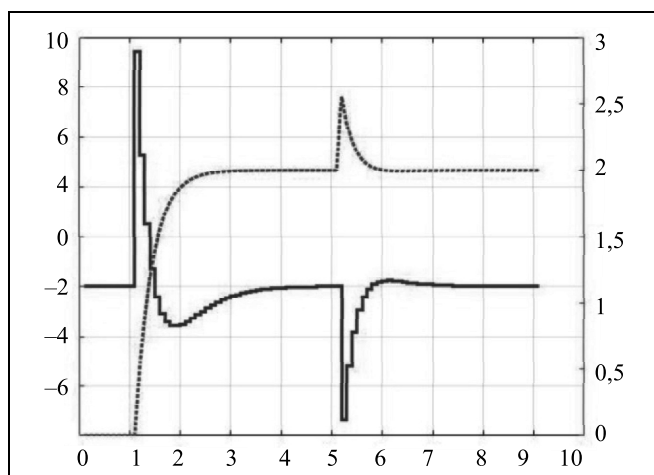


Рис. 5. Переходные процессы в замкнутой системе (31), (32), (35)

Сохраняя тот же желаемый характеристический полином, кроме полученных полиномов регулятора (32) по формуле (34) получим полином

$$q(z) = \frac{b_0(z)\delta_0(z)}{a_0(z)} = 0,2592(z - 0,7233). \quad (35)$$

Переходный процесс в замкнутой системе (31), (32), (35) с регулятором вида (33) при тех же условиях показан на рис. 5, где максимальное значение управления в 2 раза меньше, и перерегулирования нет.

5.2. Управление электродвигателем

Рассмотрим управление электродвигателем постоянного тока без учета динамики якорной цепи [27], где выход y — это угол поворота вала двигателя. Упрощенная непрерывная модель имеет вид:

$$s(Ts + 1)y = K_1 u + K_2 f.$$

Пусть коэффициенты $K_1 = 1$, $K_2 = -0,5$, постоянная времени $T = 1$, период дискретности $h = 0,1$ с. Тогда эквивалентная [27, 29, 32] дискретная модель объекта будет

$$W_u(z) = \frac{0,00484(z + 0,9672)}{(z - 1)(z - 0,9048)},$$

$$W_f(z) = \frac{-0,00242(z + 0,9672)}{(z - 1)(z - 0,9048)}. \quad (36)$$

Пусть желаемый радиус запасов устойчивости $r = 0,75$, желаемое время регулирования $t_p^* = 1,5$ с и ошибка регулирования при возмущении (2), для которого $f^* = 1$, должна быть не более $y^* = 0,1$.

Максимальное значение корней характеристического полинома, исходя из допустимой ошибки регулирования, определенное по формуле (16): $\lambda_{\max} = 0,7819$ и исходя из желаемого времени регулирования, определенное по формуле (17): $\lambda_{\max} = 0,8187$.

Отметим, что хотя полином $b(z)$ передаточной функции (36) устойчивый, но так как его корень отрицательный, то включение его в характеристический полином

дискретной замкнутой системы не желательно [27]. Поэтому в таком случае мы не можем находить регулятор по формулам (9), а будем находить коэффициенты регулятора c_i , d_i , $i = 0, \dots, (n - 1)$, решая систему алгебраических уравнений, полученных из уравнения (8). Для этого нужно выбрать еще один корень полинома $\delta(z)$. Например, примем $\lambda_3 = \lambda_{\max}^* = 0,7819$, а значения λ_1 и λ_2 найдем по формуле (27), приняв значения r_i как $r_1 = r_2 = \sqrt{r} = 0,866$. Эти значения удовлетворяют неравенствам (28). Тогда получаем $\lambda_1 = 0,7321$, $\lambda_2 = 0,6496$.

Сформировав желаемый характеристический полином

$$\delta(z) = (z - 0,7321)(z - 0,6496)(z - 0,7819),$$

получаем полиномы передаточной функции регулятора

$$c(z) = z - 0,3377, \quad d(z) = 16,32z - 14,17. \quad (37)$$

Радиус запасов устойчивости замкнутой системы (36), (37) равен 0,757, что больше заданного. Переходный процесс в замкнутой системе (36), (37) при ступенчатом возмущении $f = 1$ показан на рис. 6, откуда видно, что время регулирования составляет 1,94 с, что несколько больше требуемого значения 1,5 с. Ошибка регулиро-

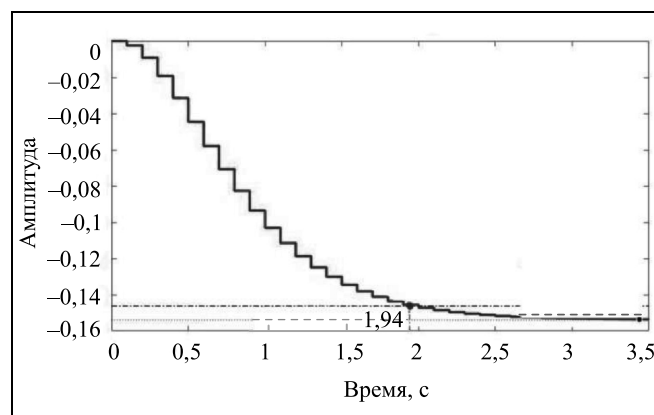


Рис. 6. Переходный процесс в замкнутой системе (36), (37)

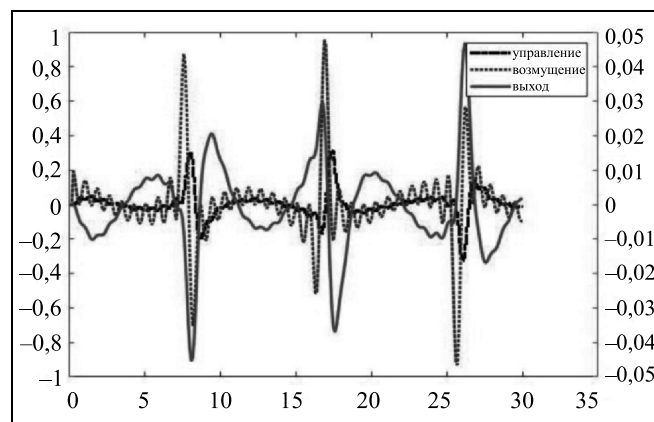


Рис. 7. Реакция замкнутой системы (36), (37) на полигармоническое возмущение

вания равна 0,154, что также больше заданного значения 0,1. Это обусловлено тем, что при построении регулятора для этого примера не может быть соблюдена процедура, описанная в статье, и предлагаемое решение следует рассматривать как основу для поиска регулятора, более полно удовлетворяющего поставленным требованиям. Но и полученный регулятор (37) может быть полезен. На рис. 7 приведен результат моделирования замкнутой системы (36), (37) при возмущении вида

$$f(k) = \sum_{i=1}^{10} \frac{f^*}{10} \sin((0,5 + 0,7i)hk + (i - 1)),$$

при $f^* = 1$. Видно, что при этом выход объекта остается в пределах $\pm 0,05$, что меньше заданного значения максимальной ошибки регулирования 0,1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен синтез дискретных регуляторов по измеряемому выходу для одномерных объектов по заданным инженерным критериям качества на основе метода модального управления. Модальный подход к решению этой проблемы выявляет противоречивость этих инженерных показателей качества: требования к ошибке и времени регулирования определяют максимальные значения корней характеристического полинома замкнутой системы, что при высоких требованиях может приводить к корням, близким к нулю, в то время как требование к радиусу запасов устойчивости связывает значения корней характеристического полинома замкнутой системы с полюсами объекта управления. Приведены аналитические формулы для выбора корней желаемого характеристического полинома замкнутой системы, которые обеспечивают заданные ошибку регулирования, время регулирования и радиус запасов устойчивости для минимально-фазового объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронов А.А. Основы теории автоматического управления: Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем. — М.: Энергия, 1980. [Voronov, A.A. Fundamentals of Automatic Control Theory: Automatic Control of Continuous Linear Systems. — M.: Energy, 1980. (In Russian)]
2. MacFarlane, A.G.J. The Development of Frequency-response Methods in Automatic Control // IEEE Trans. Autom. Control. — 1979. — Vol. 24, No. 2. — P. 250—65.
3. Zhou, K., Doyle, J., Glover, K. Robust and Optimal Control. — NJ: Prentice-Hall, 1996.
4. Zhou, K., Doyle, J.C. Essentials of Robust Control. — NJ: Prentice-Hall, 1998.
5. Skogestad, S., Postlethwaite, I. Multivariable Feedback Control. Analysis and Design. — N.-Y.: John Wiley and Sons, 2006.
6. Keel, L.H., Bhattacharyya, S.P. Robust, Fragile, or Optimal? // IEEE Trans. Autom. Control. — 1997. — Vol. 42. — P. 1098—1105.
7. Anderson, B.D.O., Moore, J.B. Optimal Control. Linear Quadratic Methods. — N.-Y.: Prentice Hall, 1990.

8. Александров А.Г. Синтез регуляторов многомерных систем. — М.: Машиностроение, 1986. [Alexandrov, A.G. Control Design for Multivariable Systems. — M.: Mashinostroenie, 1986. (In Russian)]
9. Александров А.Г. Методы построения систем автоматического регулирования. — М.: Физматлит, 2008. [Alexandrov, A.G. Design Methods for Automatic Control Systems. — M.: Fizmatlit, 2008. (In Russian)]
10. Александров А.Г. Критерии грубости нестационарных систем автоматического регулирования // Аналитические методы синтеза регуляторов: Межвуз. науч. сб. — Саратов: Саратов. политехн. ин-т. — 1980. — С. 3—14. [Alexandrov, A.G. The Robustness Criteria for Non-stationary Control Systems // Analytical Methods for Control Design — Saratov, 1980. — P. 3—14. (In Russian)]
11. Åström, K.J., Murray, R.M. Feedback Systems: an Introduction for Scientists and Engineers. — NJ: Princeton University Press, 2008.
12. Честнов В.Н. Синтез регуляторов многомерных систем по заданному радиусу запасов устойчивости на базе процедуры оптимизации // Автоматика и телемеханика. — 1999. — № 7. — С. 100—109. [Chestnov, V.N. Synthesis of Controllers for Multivariate Systems with a Given Radius of Stability Margin by the H_∞ -optimization Method // Automation and Remote Control. — 1999. — Vol. 60, No. 7 — P. 986—993.]
13. Alexandrov, A.G., Chestnov, V.N. Accurate Control of Steady-state and H_∞ Suboptimal Control // Proc. Conf. ECC. — Brussels, 1997. — P. 712—716.
14. Александров А.Г., Честнов В.Н. Синтез многомерных систем заданной точности. II. Применение процедур H_∞ -оптимизации // Автоматика и телемеханика. — 1998. — № 8. — С. 124—138. [Alexandrov, A.G., Chestnov, V.N. Synthesis of Multivariable Systems of Prescribed Accuracy. II. Use of Procedures of H_∞ -optimization // Automation and Remote Control. — 1998. — Vol. 59, No. 8. — P. 1153—1164.]
15. Агафонов П.А., Честнов В.Н. Синтез регуляторов по заданному радиусу запасов устойчивости с учетом внешних возмущений на основе H_∞ -подхода // Автоматика и телемеханика. — 2004. — № 10. — С. 101—108. [Agafonov, P.A., Chestnov, V.N. Controllers of a Given Radius of Stability Margin: Their Design by the H_∞ -approach with Regard for External Disturbances // Automation and Remote Control. — 2004. — Vol. 65, No. 10. — P. 1611—1617.]
16. Честнов В.Н. Синтез робастных H_∞ -регуляторов многомерных систем по заданной степени устойчивости // Автоматика и телемеханика. — 2007. — № 3. — С. 199—205. [Chestnov, V.N. Design of Robust H_∞ -controllers of Multivariable Systems Based on the Given Stability Degree // Automation and Remote Control. — 2007. — Vol. 68, No. 3. — P. 557—563.]
17. Александров А.Г. Построение дискретных систем управления с заданными свойствами // Автоматика и телемеханика. — 1973. — № 9. — С. 57—66. [Alexandrov, A.G. Construction of Discrete Control Systems with Given Properties // Automation and Remote Control. — 1973. — Vol. 34, No. 9. — P. 1414—1423.]
18. Александров А.Г., Честнов В.Н. Свойства аналитически сконструированных систем с цифровыми регуляторами // Известия вузов. Приборостроение. — 1987. — № 4. — С. 13—17. [Alexandrov, A.G., Chestnov, V.N. Properties of Analytically Designed Systems with digital controllers // Journal of Instrument Engineering. — 1987. — No. 4. — P.13—17. (In Russian)]
19. Shaked, U. Guaranteed Stability Margins for the Discrete-Time Linear-Quadratic Optimal Regulator // IEEE Trans. Autom. Control. — 1986. — Vol. 31, No. 2. — P. 162—165.
20. Честнов В.Н. Предельно достижимая точность линейных систем с дискретными регуляторами // Автоматика и телемеханика. — 2014. — № 2. — С. 193—214. [Chestnov, V.N. Maximum Achievable Precision of Linear Systems with Discrete



- Controllers // Automation and Remote Control. — 2014. — Vol. 75, No. 2. — P. 333–350.]
21. *Честнов В.Н., Шатов Д.В.* Синтез одномерных регуляторов по заданному показателю колебательности: модальный и H_∞ -подходы // Проблемы управления. — 2019. — № 2. [Chestnov, V.N., Shatov, D.V. Scalar Controllers Design of Given Oscillation Index: Modal and H_∞ approaches. — Control Sciences. — 2019. — No. 2. (In Russian)]
 22. *Честнов В.Н.* Синтез дискретных H_∞ -регуляторов по заданному радиусу запасов устойчивости и времени регулирования // Автоматика и телемеханика. — 2014. — № 9. — С. 65–82. [Chestnov, V.N. Synthesis of Discrete H_∞ -controllers with Given Stability Margin Radius and Settling Time // Automation and Remote Control. — 2014. — Vol. 75, No. 9. — P. 1593–1607.]
 23. *Честнов В.Н.* Модальное управление одномерными объектами с учетом заданного радиуса запасов устойчивости // Тр. междунар. науч. конф. «Аналитическая теория автоматического управления и ее приложения». — Саратов: Изд-во СГТУ, 2000. — С. 159–164. [Chestnov, V.N. Modal Control of One-dimensional Plants with Allowance for the Given Radius of the Stability Margins // Proc. Int. Conf. Analytical Theory of Automatic Control and its Applications, Saratov: SGTU, 2000. — P. 159–164. (In Russian)]
 24. *Александров А.Г.* Запасы устойчивости систем оптимального и модального управления. // Автоматика и телемеханика. — 2007. — № 8. — С. 4–20. [Alexandrov, A.G. Stability Margins of the Systems of Optimal and Modal Control // Automation and Remote Control. — 2007. — Vol. 68, No. 8. — P. 1296–1308.]
 25. *Александров А.Г.* Синтез регуляторов по показателям точности и быстродействию. I. Минимально-фазовые одномерные объекты // Автоматика и телемеханика. — 2015. — № 5. — С. 27–42. [Alexandrov, A.G. Controller Design in Precision and Speed. I. Minimal Phase One-dimensional Plants // Automation and Remote Control. — 2015. — Vol. 76, No. 5. — P. 749–761.]
 26. *Александров А.Г.* Синтез регуляторов по показателям точности и быстродействию. II. Неминимально-фазовые объекты // Автоматика и телемеханика. — 2017. — № 6. — С. 3–17. [Alexandrov, A.G. Controller Design in Precision and Speed. II. Nonminimal-phase Plants // Automation and Remote Control. — 2017. — Vol. 78, No. 6. — P. 961–973.]
 27. *Острем К., Вумтенмарк Б.* Системы управления с ЭВМ. — М.: Мир, 1987. [Åström, K.J., Wittenmark, B. Computer-Controlled Systems: Theory and Design. — Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1984.]
 28. *Гайдук А.Р.* Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). — М.: Физматлит, 2012. [Gaiduk, A.R. Theory and Methods for the Automatic Control Systems Analytical Synthesis (Polynomial Approach). — M.: Fizmatlit, 2012. (In Russian)]
 29. *Ким Д.П.* Алгебраические методы синтеза систем автоматического управления. — М.: Физматлит, 2014. [Kim, D.P. Algebraic Methods for the Automatic Control System Synthesis. — M.: Fizmatlit, 2014. (In Russian)]
 30. *Первозванский А.А.* Курс теории автоматического управления. — М.: Наука, 1986. [Pervozvanskiy, A.A. The Course of the Automatic Control Theory. — M.: Nauka, 1986. (In Russian)]
 31. *Chestnov, V.N., Shatov, D.V.* Multivariable Systems Design of Desired Accuracy Based on LQ and H-Infinity Optimization Procedures // Proc. of the European Control Conference. — Limassol, Cyprus, 2018. — P. 2511–2516.
 32. *Мирошник И.В.* Теория автоматического управления. Линейные системы. — СПб.: Питер, 2005. [Miroshnik, I.V. Theory of Automatic Control. Linear Systems. — SPb.: Piter, 2005. (In Russian)]

Статья представлена к публикации членом редколлегии С.А. Красновой.

Поступила в редакцию 20.12.2018, после доработки 27.06.2019.
Принята к публикации 29.07.2019.

Честнов Владимир Николаевич — д-р техн. наук,
✉ vnchest@yandex.ru,

Александров Вадим Альбертович — канд. техн. наук,
✉ va.alexandrov@yandex.ru,

Резков Илья Геннадьевич — канд. техн. наук,
✉ fagothmail@gmail.com,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва.

SYNTHESIS OF DISCRETE MODAL SISO CONTROLLERS BY ENGINEERING PERFORMANCE INDICES

V.N. Chestnov, V.A. Alexandrov[#], I.G. Rezkov

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[#]✉ va.alexandrov@yandex.ru

Abstract. The linear discrete minimum-phase plant with one control input, one measured output and with an unmeasured external disturbance is considered. The problem is stated of the design of the discrete output controller that provides the preset engineering performance indices: control error, settling time, stability margins radius. Analytical formulas are obtained that allow to relate the engineering performance indices with the desired closed system characteristic polynomial roots in the modal control problem when choosing real non-negative roots. At the same time, the specified control error and the settling time lead to the constraints on the maximum absolute value of the desired roots, while the values of the desired roots, providing the given radius of stability margins, may not satisfy these constraints, so the specified values of the performance indices should be revised. Examples are given showing the effectiveness of the approach proposed.

Keywords: discrete linear system, modal control, control error, settling time, stability margin radius.

АДАПТИВНО-РОБАСТНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ КОРНЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ИНТЕРВАЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ДОМИНИРУЮЩИХ ПОЛЮСОВ¹

И.В. Хожаев, С.А. Гайворонский, Т.А. Езангина

Аннотация. Рассмотрена задача разработки методов синтеза линейных адаптивно-робастных регуляторов пониженного порядка, позволяющих в системах с интервально-неопределенными параметрами обеспечить постоянные значения корневых показателей качества управления. Для стабилизации динамических свойств системы предложено располагать области локализации ее полюсов по принципу доминирования. Размещение доминирующих полюсов в заданных точках комплексной плоскости обеспечено подстройкой части параметров регулятора, а уменьшение влияния остальных полюсов на динамические свойства системы достигнуто выбором постоянных значений остальных параметров регулятора. Предложены методики синтеза регуляторов, сочетающие в себе достоинства адаптивного и робастного подходов к управлению системами с интервальными параметрами. Отмечено, для применения предложенных методик необходима линейная модель системы в виде характеристического полинома с интервальными коэффициентами, а для подстройки параметров регулятора необходимы оценки текущих значений интервальных параметров.

Ключевые слова: адаптивное управление, робастное управление, интервальные параметры, параметрическая неопределенность, синтез, имитационное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что многие объекты и системы характеризуются параметрической неопределенностью. Очевидно, что для эффективного управления такими объектами необходимо учитывать неопределенность их параметров при синтезе регуляторов. Существует ряд подходов к управлению такими объектами, в том числе адаптивный, на базе нейронных сетей, на базе нечеткой логики и робастный подход. Каждому из них присущи свои преимущества и недостатки. Так, например, адаптивный регулятор способен обеспечить стабильное качество регулирования в системе, однако из-за низкого быстродействия контура адаптации такой регулятор часто не способен компенсировать быстрые изменения параметров объекта или системы в целом в широких диапазонах [1—3]. Регуляторы, основанные на нейронных сетях, также способны обеспечить стабильное качество регулирования, однако обучение нейронной сети требует

большого количества экспериментальных данных об объекте и высокой квалификации специалистов [4—6]. Кроме того, указанные регуляторы имеют сложную структуру. Регулятор на базе нечеткой логики более прост в реализации, однако процедура синтеза базы правил мало формализована, и ее результат зависит от квалификации и опыта инженера [7—9]. Робастный подход к управлению в отличие от ранее перечисленных позволяет управлять объектами с неопределенными параметрами с помощью регулятора предельно простой структуры — линейного регулятора с постоянными параметрами. При этом робастный регулятор способен компенсировать изменение параметров системы в широких диапазонах, а для расчета его параметров достаточно знать минимальную и максимальную оценки значений неопределенных параметров системы. Недостаток такого подхода заключается в низких динамических свойствах робастных систем, а также в нестабильности значений показателей качества [10—18]. Таким образом, задача разработки методов синтеза регуляторов для систем автоматического управления с нестационарными параметрами остается актуальной.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 18-79-00264.



Известны примеры применения комбинированных методов синтеза, совмещающих в себе свойства различных подходов к управлению [19–23]. Настоящая работа посвящена разработке метода синтеза регулятора, обладающего одновременно преимуществами адаптивного и робастного регуляторов: достаточными динамическими свойствами системы, стабильными значениями показателей качества регулирования, простой структурой регулятора, а также способностью сохранять желаемое качество регулирования при быстрых изменениях параметров системы в широких диапазонах по неизвестным законам. Предполагается, что есть возможность прямо или косвенно измерить значения нестационарных параметров или оценить их каким-либо иным способом. Для достижения данной цели необходимо решить ряд задач: сформулировать проблему исследования, разработать и апробировать алгоритм синтеза адаптивно-робастного регулятора.

1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Рассматривается проблема управления системами с интервальными параметрами. Значения таких параметров могут изменяться внутри диапазонов, границы которых заранее известны или могут быть оценены экспериментально. Здесь и далее будем рассматривать объекты управления, чьи передаточные функции имеют положительные коэффициенты. Предлагаемый метод синтеза основан на корневом подходе, позволяющем задавать желаемое качество регулирования через расположение полюсов системы желаемым образом. Для дальнейших вычислений определим форму характеристического полинома системы с интервальными параметрами или интервального характеристического полинома (ИХП):

$$D(s, \vec{K}) = \sum_{i=0}^n [q_i(\vec{K})]s^i = \sum_{i=0}^n [\underline{q}_i, \bar{q}_i]s^i, \quad (1)$$

где $D(s, \vec{K})$ — ИХП системы, $\vec{K}$ — вектор параметров регулятора, $q_i(\vec{K})$ — зависимости коэффициентов ИХП от коэффициентов регулятора, $\underline{q}_i$ и $\bar{q}_i$ — минимальные и максимальные значения коэффициентов ИХП, в которые входят коэффициенты регулятора.

Корни полинома (1), являющиеся полюсами системы, определяют значения корневых показателей качества робастного управления: степени робастной устойчивости η , равной модулю вещественной части ближайшего к мнимой оси полюса

системы, и степени робастной колебательности μ , равной максимальному отношению модулей мнимой и вещественной частей полюсов системы. Изменение интервальных параметров системы вызывает миграцию полюсов системы внутри областей их локализации, что в свою очередь ведет к нестабильности значений корневых показателей качества управления. Для уменьшения колебаний значений корневых показателей качества применяется принцип доминирования полюсов, согласно которому качество управления может быть задано соответствующим размещением нескольких доминирующих полюсов и удалением остальных свободных полюсов от доминирующих для уменьшения их влияния на переходный процесс. Авторами разработаны методы синтеза робастных регуляторов [24, 25], основанные на корневом подходе к синтезу и методе доминирующих полюсов. Данные методы позволяют размещать области локализации полюсов системы с интервальными параметрами в соответствии с желаемым качеством управления. Примеры такого расположения областей локализации полюсов приведены на рис. 1.

Расположение полюсов системы, показанное на рис. 1, а, обеспечивает в системе апериодический тип переходного процесса, длительность которого определяется положением вещественного доминирующего полюса внутри заданного отрезка. Расположение полюсов системы, показанное на рис. 1, б, обеспечивает в системе колебательный тип переходного процесса, при этом его длительность и колебательность определяются положением пары комплексно-сопряженных доминирующих полюсов внутри заданных областей. В обоих случаях свободные полюсы расположены на удалении от доминирующих для уменьшения их влияния на качество управления. Обозначим минимальное расстояние между мнимой осью комплексной плоскости и границей области размещения свободных полюсов как степень доминирования δ . Для выполнения принципа доминирования необходимо, чтобы степень доминирования δ превышала желаемую степень устойчивости системы η в шесть раз [26].

Из рис. 1 очевидно, что применение метода доминирующих полюсов к решению задачи синтеза систем с интервальными параметрами позволяет уменьшить нестабильность корневых показателей качества управления, но не исключить ее. Таким образом, цель данной работы состоит в развитии ранее упомянутых методов синтеза и обеспечении возможности размещать доминирующие полюсы системы в желаемых точках комплексной плоскости, а не в ее областях. Это позволит стабилизировать степень устойчивости и степень колебательности системы при изменениях ее параметров.

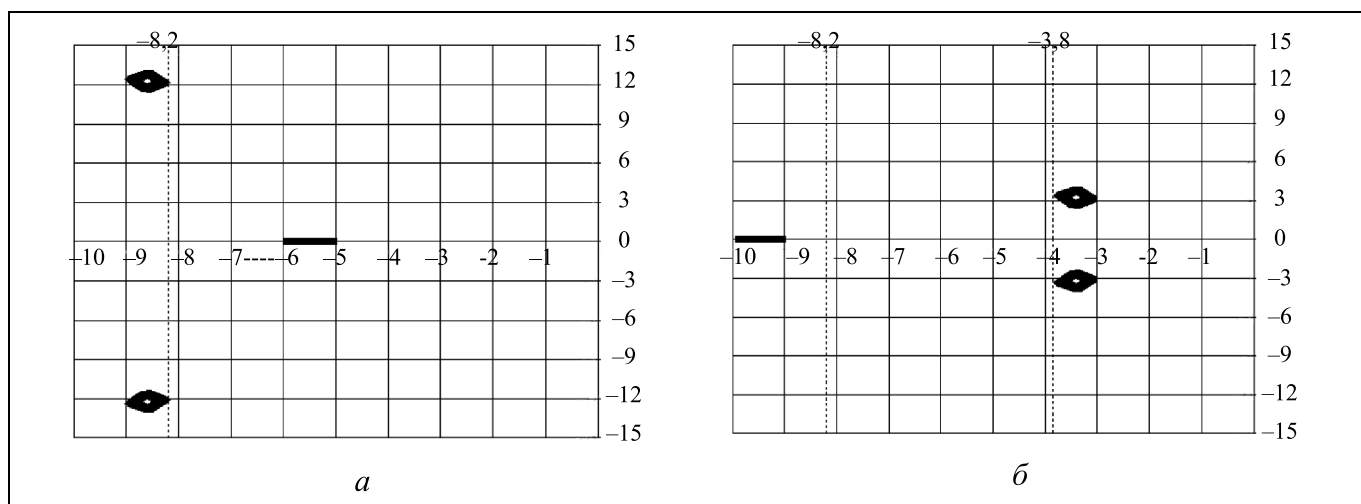


Рис. 1. Примеры расположения областей локализации полюсов системы автоматического управления с интервальными параметрами: *а* — с одним вещественным доминирующим полюсом; *б* — с парой комплексно-сопряженных полюсов

Предлагаемый метод синтеза основан на разложении ИХП (1) на три части: доминирующий полином $A(s)$, определяющий положение доминирующих полюсов; свободный полином $B(s, \vec{K})$, являющийся результатом деления исходного ИХП на доминирующий полином и определяющий положение свободных полюсов, и остаток от этого деления $R(s, \vec{K})$. Учитывая это, ИХП (1) можно переписать как

$$D(s, \vec{K}) = A(s)B(s, \vec{K}) + R(s, \vec{K}). \quad (2)$$

С учетом введенных обозначений процесс синтеза регулятора можно разбить на три этапа: задание положения доминирующих полюсов в соответствии с желаемыми значениями корневых показателей качества; обеспечение региональной устойчивости свободного полинома; обеспечение равенства нулю остатка.

В данной работе будут рассмотрены два случая размещения доминирующих полюсов и, соответственно, два варианта доминирующих полиномов: первый — для размещения одного вещественного полюса и второй — для размещения двух комплексно-сопряженных полюсов. В первом случае доминирующий полином может быть записан в виде

$$A(s) = s - \lambda, \quad (3)$$

где λ — вещественный доминирующий полюс системы, заданный своим постоянным значением; при этом $\lambda < 0$. Во втором случае доминирующий полином имеет вид:

$$A(s) = (s - \lambda_1)(s - \lambda_2) = (s - \alpha - j\beta)(s - \alpha + j\beta), \quad (4)$$

где λ_1 и λ_2 — пара комплексно-сопряженных полюсов системы; α и β — их вещественная и мнимая части соответственно, заданные своими постоянными значениями; при этом $\alpha < 0$. Отметим, что в обоих случаях доминирующий полином имеет постоянные коэффициенты, зависящие от положения доминирующих полюсов, задающих желаемые значения корневых показателей качества регулирования.

Таким образом, сформулируем цель исследования: на основе метода доминирующих полюсов и декомпозиции ИХП (1) в соответствии с выражением (2) разработать метод синтеза адаптивно-робастного регулятора, обеспечивающего постоянство заданных значений корневых показателей качества регулирования для двух вариантов (3) и (4) доминирующих полиномов.

2. ВЫВОД ОСНОВНЫХ СООТНОШЕНИЙ

Для достижения цели исследования необходимо вывести выражения, позволяющие рассчитать коэффициенты свободного полинома и остаток в зависимости от коэффициентов исходного ИХП и расположения доминирующих полюсов.

При размещении одного вещественного доминирующего полюса искомые выражения принимают вид:

$$[b]_i = [q(\vec{K})]_{i+1} + [b]_{i+1}\lambda; \quad i \in n-1, \dots, 0, \quad (5)$$

$$R(\vec{K}) = D(\lambda, \vec{K}), \quad (6)$$

где $[b]_i$ — интервальные коэффициенты свободного полинома $B(s, \vec{K})$; n — порядок ИХП; $[q_i(\vec{K})]$ —

интервальные коэффициенты ИХП, зависящие от параметров регулятора; λ — значение доминирующего полюса, определяющего качество регулирования в системе; $R(\vec{K})$ — остаток от деления ИХП $D(s, \vec{K})$ на доминирующий полином $A(s)$.

При размещении пары комплексно-сопряженных полюсов искомые выражения принимают вид:

$$[b]_i = [q]_{i+2} + x[b]_{i+1} - y[b]_{i+2}, \quad i \in n-2, \dots, 0; \quad (7)$$

$$R(s) = (q_1(\vec{z}) + xb_0(\vec{z}) - yb_1(\vec{z}))s + q_0(\vec{z}) - yb_0(\vec{z}); \quad (8)$$

где $[b]_i$ — коэффициенты свободного полинома, x — сумма доминирующих полюсов, y — произведение доминирующих полюсов, n — степень ИХП; $R(s)$ — остаток; $q_0(\vec{z})$, $q_1(\vec{z})$, $b_0(\vec{z})$, $b_1(\vec{z})$ — зависимости коэффициентов ИХП и свободного полинома от вектора интервальных параметров $\vec{z}$.

На основе полученных выше выражений сформируем алгоритмы синтеза адаптивно-робастных регуляторов с желаемыми свойствами.

3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ СИНТЕЗА

3.1. Алгоритм размещения одного вещественного доминирующего полюса

Для разработки алгоритма размещения одного вещественного доминирующего полюса системы с интервальными параметрами определим входные данные. Здесь и далее будем предполагать, что известны передаточные функции всех элементов системы, а также границы интервалов изменения их параметров.

В первую очередь, необходимо задать желаемое качество управления в синтезируемой системе так, как показано на рис. 2, где степень устойчивости η системы задана положением вещественного доминирующего полюса λ ; степень робастной колебательности системы μ задана границами области локализации свободных полюсов; независимость качества управления в системе от свободных полюсов обеспечивается степенью доминирования δ .

После задания цели синтеза необходимо выбрать структуру регулятора. Для обеспечения показанного на рис. 2 расположения полюсов необходим регулятор с не менее чем двумя настраиваемыми параметрами. Подстройка одного из этих параметров будет обеспечивать желаемое положение доминирующего полюса; второй параметр, имеющий постоянное значение, обеспечит желаемое положение всех свободных полюсов систе-

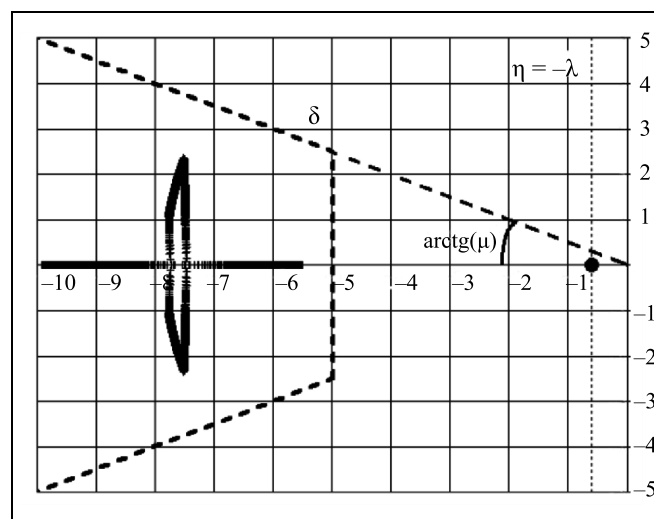


Рис. 2. Пример задания желаемого качества регулирования в синтезируемой системе

мы. Рекомендуется ПИ-регулятор с передаточной функцией:

$$W_{PI}(s, K_p, K_I) = K_p + \frac{K_I}{s}, \quad (9)$$

где K_p и K_I — пропорциональный и интегральный коэффициенты ПИ-регулятора.

Зная передаточную функцию регулятора, найдем передаточную функцию замкнутой системы и ее ИХП в форме (1). Подставив коэффициенты ИХП в формулу (6), найдем остаток от деления ИХП на доминирующий полином (3). Приравняв остаток $R(\vec{K})$ к нулю и выразив один параметр регулятора через другой, получим закон адаптации одного из коэффициентов ПИ-регулятора. Предлагается адаптировать пропорциональный коэффициент регулятора к изменениям интервальных параметров системы. В таком случае закон адаптации в общем виде может быть записан как

$$K_p = f(K_p, \vec{z}), \quad (10)$$

где $\vec{z}$ — вектор интервальных параметров системы.

Для дальнейших вычислений необходимо подставить соотношение (10) в выражение (1). После такой подстановки коэффициенты ИХП будут зависеть от параметров системы и только от одного из параметров регулятора. Коэффициенты ИХП в такой форме можно использовать для вычисления коэффициентов свободного полинома $B(s, \vec{K})$ с помощью выражения (5).

Зная зависимости коэффициентов свободного полинома от одного из коэффициентов регулятора (в нашем случае — от интегрального коэффициента ПИ-регулятора), можно разместить его корни

желаемым образом с помощью метода D -разбиения. Для этого необходимо подставить в свободный полином уравнение границы желаемой области локализации свободных полюсов синтезируемой системы и найти область устойчивости на оси искомого параметра. Так, например, для размещения свободных полюсов левее некоторой прямой на комплексной плоскости необходимо выполнить подстановку:

$$s \rightarrow j\omega + \delta, \quad \delta \leq 0, \quad (11)$$

где δ — степень доминирования, максимальная вещественная часть свободного полюса. Для размещения свободных полюсов в секторе, ограниченном выходящими из начала координат комплексной плоскости лучами, необходимо выполнить подстановку:

$$s \rightarrow \frac{1}{\mu} \omega + j\omega, \quad \mu \geq 0, \quad (12)$$

где μ — желаемая максимальная степень колебательности системы. Использование значений коэффициента регулятора из пересечения областей устойчивости, найденных с помощью этих двух подстановок, позволит разместить свободные полюсы в усеченном секторе, как показано на рис. 2. В том случае, если области устойчивости не пересекаются, разместить свободные полюсы желаемым образом не удастся. В таком случае предлагается снизить желаемую степень доминирования.

Резюмируя изложенное, сформулируем алгоритм синтеза адаптивно-робастного регулятора для размещения одного вещественного доминирующего полюса.

Шаг 1. Задать желаемые значения степени устойчивости и степени робастной колебательности системы с помощью доминирующего полюса λ и границы области локализации свободных полюсов.

Шаг 2. Выбрать линейный регулятор; записать ИХП системы в форме (1).

Шаг 3. Рассчитать остаток с помощью формулы (6); приравнять остаток к нулю и получить закон адаптации одного из коэффициентов регулятора в форме (10), решив полученное уравнение.

Шаг 4. Подставить закон адаптации (10) в выражение (1); рассчитать интервалы коэффициентов свободного полинома с помощью выражения (5).

Шаг 5. Вывести уравнения кривых D -разбиения в вершинах многогранника коэффициентов свободного полинома, выполнив подстановку (11) или (12).

Шаг 6. Исходя из D -разбиения, выбрать значения остальных параметров регулятора и подставить их в закон адаптации (10).

Таким образом, реализуемый регулятором закон управления представляет собой совокупность выражения для адаптации пропорционального коэффициента регулятора и постоянного значения интегрального коэффициента регулятора.

3.2 Алгоритм размещения пары комплексно-сопряженных полюсов

Аналогично п. 3.1 сформулируем алгоритм размещения пары комплексно-сопряженных доминирующих полюсов системы с интервальными параметрами, определив последовательно входные данные, сам алгоритм и выходные данные.

Размещение пары комплексно-сопряженных полюсов позволяет стабилизировать степень устойчивости и степень колебательности синтезируемой системы. Пример такого расположения полюсов приведен на рис. 3, где степень устойчивости системы η и степень ее колебательности μ определены расположением пары комплексно-сопряженных доминирующих полюсов. Независимость качества регулирования от свободных полюсов определяется степенью доминирования δ и углом сектора, в котором они расположены. Отметим, что тангенс угла сектора, в котором размещены свободные полюсы, должен быть меньше или равен степени колебательности системы, заданной доминирующими полюсами.

Определив цель синтеза, выберем регулятор. Для обеспечения расположения полюсов, показанного на рис. 3, необходим регулятор с не менее чем тремя настраиваемыми параметрами: два из

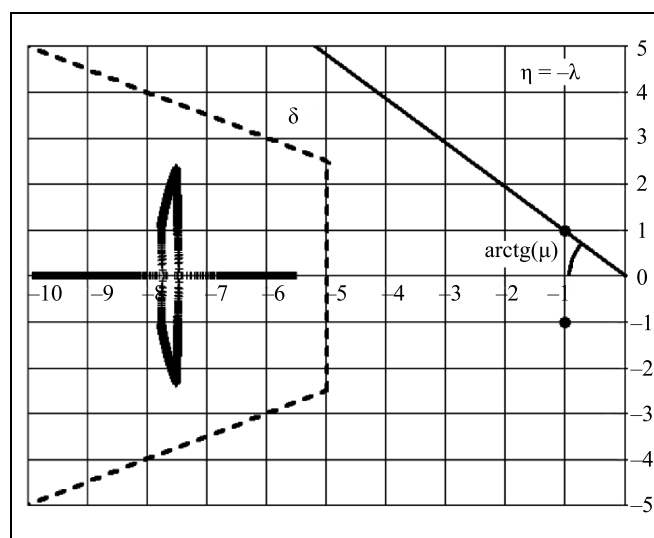


Рис. 3. Пример задания желаемого качества регулирования в синтезируемой системе через расположение пары доминирующих полюсов и параметры области локализации свободных полюсов



них обеспечат стабилизацию доминирующих полюсов, третий — расположение свободных полюсов в заданной области. Аналогично алгоритму, изложенному в п. 3.1, число параметров регулятора может быть увеличено для создания более сложной формы области локализации свободных полюсов. Здесь и далее для размещения пары комплексно-сопряженных доминирующих полюсов будем применять ПИД-регулятор:

$$W_{PID}(s, K_p, K_I, K_D) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s, \quad (13)$$

где K_p , K_I и K_D — пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты ПИД-регулятора.

Выбрав регулятор, рассчитаем передаточную функцию замкнутой системы и ее ИХП в форме (1). Коэффициенты ИХП используем, чтобы вывести остаток $R(s, K_p, K_I, K_D)$ с помощью выражения (8). Проведя подстановку $s \rightarrow j\omega$, выделим вещественную и мнимую части остатка, приравняем их к нулю, получив систему уравнений:

$$\begin{cases} \operatorname{Re}(R(j\omega, K_p, K_I, K_D, \vec{z})) = 0, \\ \operatorname{Im}(R(j\omega, K_p, K_I, K_D, \vec{z})) = 0. \end{cases}$$

Решив ее, получим законы адаптации пропорционального и интегрального коэффициентов ПИД-регулятора к изменению интервальных параметров системы. В общем виде такие законы могут быть записаны как

$$\begin{aligned} K_p &= f(K_D, \vec{z}), \\ K_I &= f(K_D, \vec{z}). \end{aligned} \quad (14)$$

Подставим законы (14) в ИХП синтезируемой системы. Теперь коэффициенты ИХП зависят только от одного из параметров регулятора — дифференциального коэффициента ПИД-регулятора. На основе коэффициентов ИХП в такой форме и выражения (7) рассчитаем коэффициенты свободного полинома. Значение дифференциального коэффициента ПИД-регулятора выберем методом D -разбиения в вершинах многогранника коэффициентов свободного полинома. Аналогично предыдущему алгоритму (см. п. 3.1) для вывода уравнений кривых D -разбиения могут быть сделаны подстановки (11) или (12).

На основании изложенного, сформулируем алгоритм размещения пары комплексно-сопряженных доминирующих полюсов.

Шаг 1. Задать желаемые значения степени устойчивости и степени робастной колебательности системы с помощью доминирующих полюсов λ_1 и

λ_2 и границы области локализации свободных полюсов.

Шаг 2. Выбрать линейный регулятор; записать ИХП системы в форме (1).

Шаг 3. Рассчитать остаток с помощью выражения (8); выразить мнимую и вещественную части остатка, приравнять их к нулю и получить законы адаптации коэффициентов ПИД-регулятора в форме (14), решив полученную систему уравнений.

Шаг 4. Подставить формулу (14) в выражение (1); рассчитать интервалы коэффициентов свободного полинома с помощью выражения (7).

Шаг 5. Вывести уравнения кривых D -разбиения в вершинах многогранника коэффициентов свободного полинома, выполнив подстановку (11) или (12).

Шаг 6. Исходя из D -разбиения, выбрать значения остальных параметров регулятора и подставить их в формулу (14).

Таким образом, синтезированный адаптивно-робастный регулятор представляет собой ПИД-регулятор, в котором пропорциональный и интегральный коэффициенты адаптируются под изменения параметров системы, а дифференциальный коэффициент имеет постоянное значение.

4. ПРИМЕРЫ

4.1. Размещение одного вещественного доминирующего полюса

Пусть необходимо обеспечить аperiodический переходный процесс и желаемую степень устойчивости системы, объект управления которой описан передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{1}{[p_3]s^3 + [p_2]s^2 + [p_1]s + [p_0]},$$

где $[p_3] = [1; 1,1]$, $[p_2] = [28; 32]$, $[p_1] = [215; 285]$ и $[p_0] = [350; 370]$ — интервальные параметры системы. Также известно, что ПИ-регулятор (9) и объект охвачены единичной отрицательной обратной связью.

В соответствии с алгоритмом синтеза зададим желаемое качество регулирования положением доминирующего полюса: $\lambda = (-1; j0)$ и степень доминирования $\delta = -3$.

Для исследуемой системы ИХП имеет вид:

$$\begin{aligned} D(s, \vec{p}, K_p, K_I) &= \\ &= [p_3]s^4 + [p_2]s^3 + [p_1]s^2 + ([p_0] + K_p)s + K_I. \end{aligned} \quad (15)$$

Учитывая выражение (6) и коэффициенты ИХП (15), получим остаток:

$$\begin{aligned} R(\vec{p}, K_p, K_I) &= [p_3]\lambda^4 + [p_2]\lambda^3 + [p_1]\lambda^2 + \\ &+ ([p_0] + K_p)\lambda + K_I = K_I - K_p - [p_0] + [p_1] - [p_2] + [p_3]. \end{aligned}$$

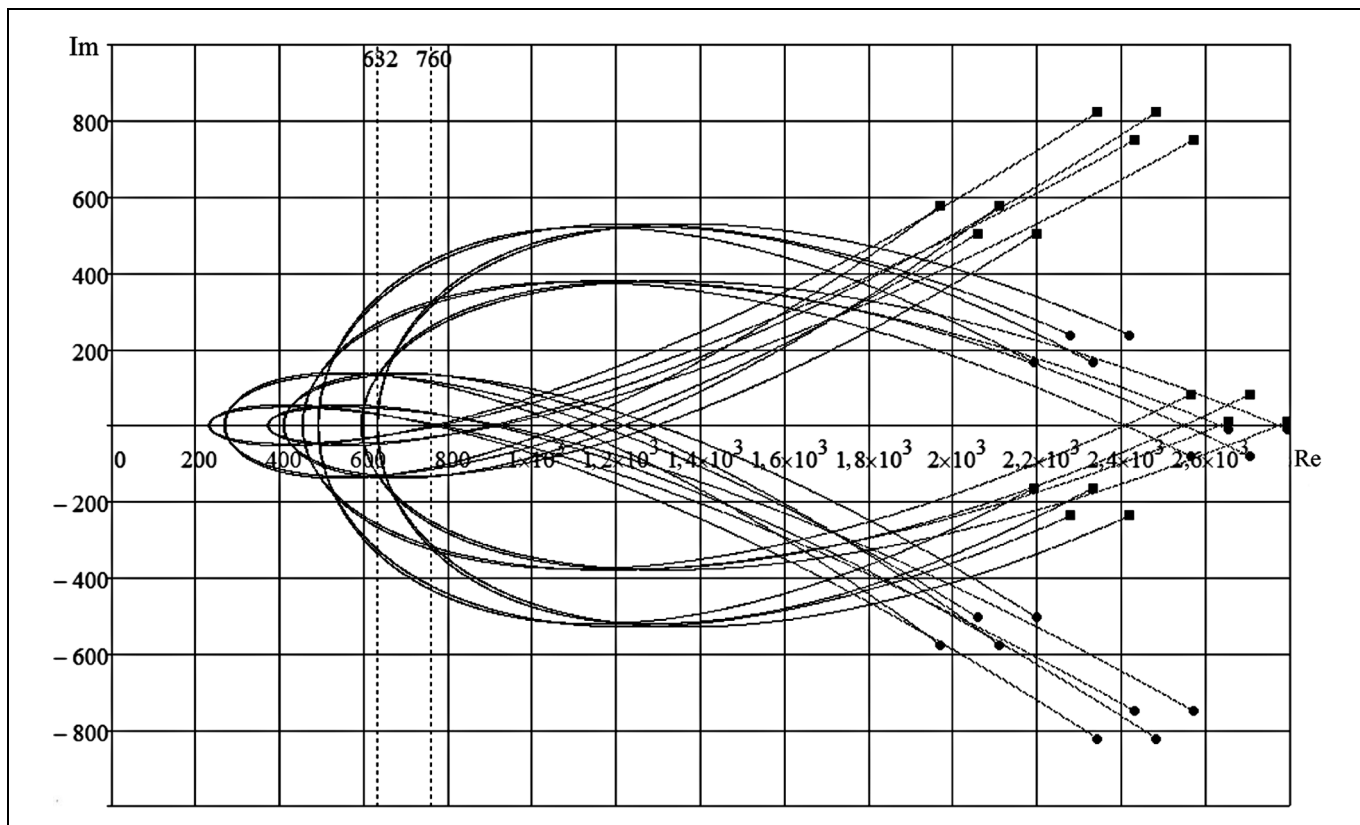


Рис. 4. D -разбиение по оси интегрального коэффициента ПИ-регулятора в вершинах многогранника коэффициентов свободного полинома

Приравняем его к нулю и, решив полученное уравнение, получим закон адаптации пропорционального коэффициента ПИ-регулятора, обеспечивающий стабилизацию доминирующего полюса в заданной точке комплексной плоскости:

$$R(\bar{p}, K_p, K_I) = 0;$$

$$K_p(\bar{p}, K_I) = K_I - [p_0] + [p_1] - [p_2] + [p_3]. \quad (16)$$

Подставим формулы (16) в ИХП (15), получим ИХП системы, коэффициенты которого зависят только от интегрального коэффициента ПИ-регулятора:

$$D(s, \bar{p}, \bar{q}, K_I) = [1; 1,1]s^4 + [28, 32]s^3 + [215, 285]s^2 + [K_I + 188; K_I + 254,1]s + K_I.$$

Используем коэффициенты этого ИХП, чтобы найти коэффициенты свободного полинома с помощью выражения (5):

$$\begin{aligned} B(s, K_I) &= [b_3]s^3 + [b_2]s^2 + [b_1]s + [b_0], \\ [b_3] &= [1; 11], \\ [b_2] &= [26,9; 31], \\ [b_1] &= [184; 258,1], \\ [b_0] &= [K_I - 70,1; K_I + 70,1]. \end{aligned} \quad (17)$$

Применим подстановку (11) к выражению (17) и выразим из него интегральный коэффициент ПИ-регулятора, получив уравнение кривой D -разбиения по его оси:

$$X(\omega, \delta) = -[-70,1; 70,1] - [184; 258,1](\delta + j\omega) - [26,9; 31](\delta + j\omega)^2 - [1; 1,1](\delta + j\omega)^3.$$

В этом уравнении четыре интервальных параметра и соответственно шестнадцать вершин многогранника коэффициентов. Перебрав все комбинации минимальных и максимальных значений интервальных параметров, получим шестнадцать уравнений кривых D -разбиения в вершинах многогранника коэффициентов свободного полинома $B(s, K_I)$. Приняв согласно цели синтеза $\delta = -3$, построим кривые D -разбиения (рис. 4).

Видно, что в пересечении всех областей устойчивости лежит отрезок вещественной оси $[632, 760]$. Исходя из D -разбиения, выберем внутри указанного отрезка $K_I = 670$.

Таким образом, параметры синтезированного адаптивно-робастного регулятора имеют вид:

$$K_p(p_0, p_1, p_2, p_3) = 670 - p_0 + p_1 - p_2 + p_3, \quad K_I = 670,$$

где p_0, p_1, p_2 и p_3 — оценки значений интервальных параметров системы или результаты их измерений. Расположение полюсов системы с синтезированным регулятором приведено на рис. 5.

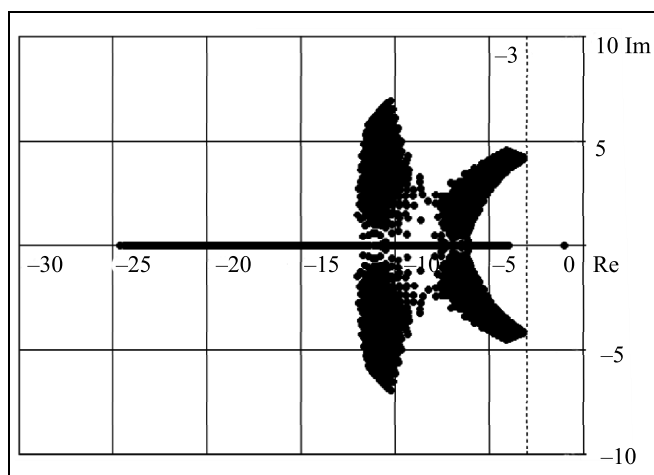


Рис. 5. Расположение полюсов синтезированной системы с одним вещественным доминирующим полюсом

Из рис. 4 можно сделать вывод, что синтез проведен успешно: доминирующий полюс стабилизирован в желаемой точке $(-1, j0)$, а свободные полюсы не выходят за пределы желаемой области локализации.

4.2. Размещение пары комплексно-сопряженных полюсов

На примере системы из п. 4.1 продемонстрируем пример размещения двух комплексно-сопряженных доминирующих полюсов.

В соответствии с алгоритмом определим желаемое качество регулирования: степень устойчивости $\eta = 1$, степень колебательности $\mu = 1$, степень доминирования $\delta = -10$. Для обеспечения таких показателей применим ПИД-регулятор (13).

Получим передаточную функцию и ИХП синтезированной системы в форме (1):

$$D(s, K_p, K_I, K_D, \bar{p}) = [p_3]s^4 + [p_2]s^3 + ([p_1] + K_D)s^2 + ([p_0] + K_p)s + K_I.$$

Коэффициенты ИХП в такой форме используем для вывода функции остатка с помощью выражения (8). Приравняв мнимую и вещественную части остатка к нулю и решив полученную систему уравнений, получим законы адаптации коэффициентов регулятора к изменению интервальных параметров системы:

$$K_p(K_D, p_1, p_2, p_3) = 2p_1 - 4p_2 + 4p_2 + 4p_3 + 2K_D,$$

$$K_I(K_D, p_0, p_1, p_2) = -p_0 + 2p_1 - 2p_2 + 2K_D, \quad (18)$$

где p_0, p_1, p_2 и p_3 — оценки значений интервальных параметров системы или результаты их измерений.

Также с помощью выражения (7) найдем коэффициенты свободного полинома:

$$B(s) = [1; 1,1]s^2 + [25,8; 30]s + [K_D + 152,8; K_D + 231,4]. \quad (19)$$

Сделав подстановки (11) и (12) в полином (19), выведем уравнения кривых D -разбиения:

$$X_1(\omega, \delta) = -[152,8; 231,4] - [25,8; 30](\delta + j\omega) - [1; 1,1](\delta + j\omega)^2, \quad (20)$$

$$X_2(\omega, \mu) = -[152,8; 231,4] - [25,8; 30]\left(\frac{1}{\mu}\omega + j\omega\right) - [1; 1,1]\left(\frac{1}{\mu}\omega + j\omega\right)^2. \quad (21)$$

Исходя из D -разбиения на рис. 6, а, можно сделать вывод, что при значениях дифференциального коэффициента из диапазона $(0; 71,2]$ будет достигнута желаемая степень робастной колебательности. Из D -разбиения на рис. 6, б можно сделать вывод, что при значениях диф-

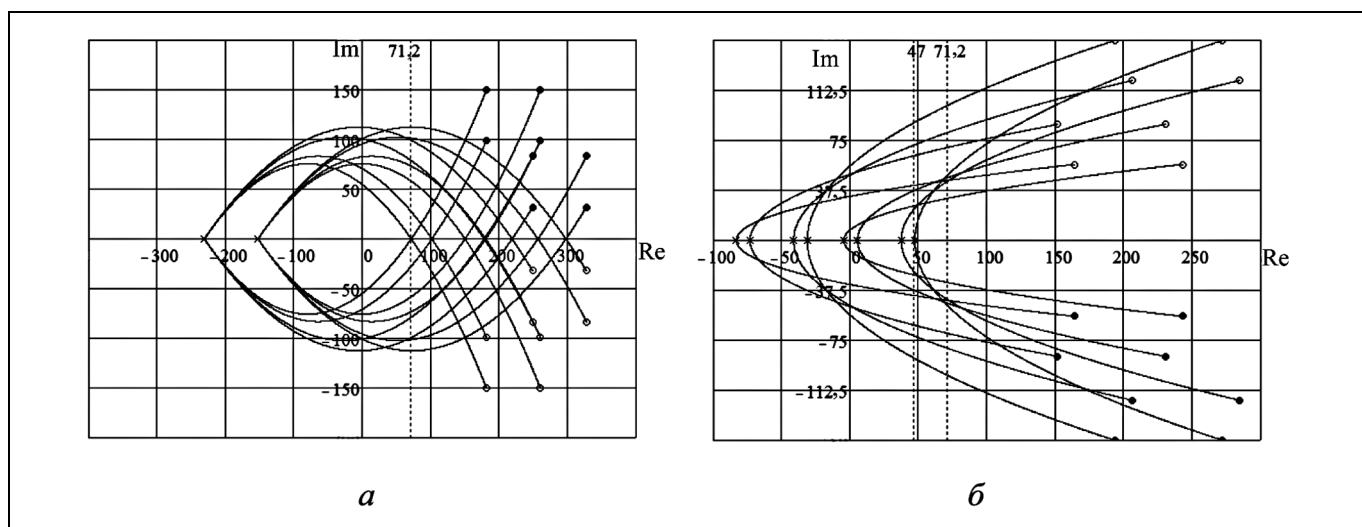


Рис. 6. D -разбиение по оси дифференциального коэффициента ПИД-регулятора в вершинах многогранника коэффициентов свободного полинома: а — по уравнению (20); б — по уравнению (21)

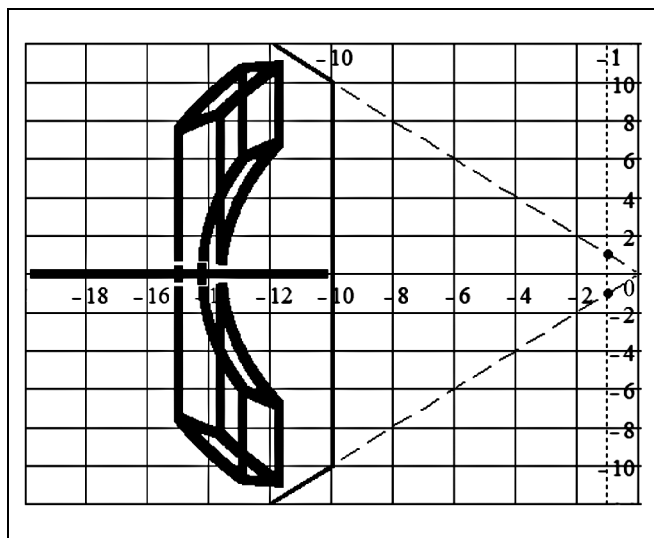


Рис. 7. Расположение полюсов синтезированной системы с парой комплексно-сопряженных доминирующих полюсов

ференциального коэффициента из диапазона $[47, +\infty)$ будет достигнута желаемая степень доминирования. Из пересечения указанных диапазонов выберем значение $K_D = 50$ и подставим его в законы адаптации (18).

Таким образом, параметры адаптивно-робастного регулятора, обеспечивающего желаемое расположение полюсов, имеют вид:

$$K_p(K_D, p_1, p_2, p_3) = 2p_1 - 4p_2 + 4p_3 + 100,$$

$$K_i(K_D, p_0, p_1, p_2) = -p_0 + 2p_1 - 2p_2 + 100,$$

$$K_D = 50.$$

Расположение полюсов синтезированной системы приведено на рис. 7, из которого можно сделать вывод, что синтез выполнен успешно: доминирующие полюсы стабилизированы в заданных точках комплексной плоскости, а свободные полюсы не выходят за пределы желаемых областей локализации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемые методы позволяют синтезировать адаптивно-робастный регулятор, обеспечивающий постоянные значения степени устойчивости и степени колебательности в условиях интервальной неопределенности параметров системы. Разработанные методы синтеза основаны на методе доминирующих полюсов и сочетают в себе преимущества робастного и адаптивного подходов к управлению. Синтезированные регуляторы сохраняют эффективность при быстрых изменениях параметров системы в широких диапазонах, обеспечивают желаемые динамические свойства системы,

для настройки требуют минимальное количество информации о системе. Эти свойства продемонстрированы в приведенных примерах синтеза.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Holtsov, A.S.* Comparison of the UAV Adaptive Control with the Robust Control Based on Mu-synthesis // *Proc. of MSNMC.* — Kiev, 2016. — P. 18–21.
2. *He, W.* Adaptive Boundary Iterative Learning Control for an Euler–Bernoulli Beam System with Input Constraint // *IEEE Trans. on Neural Networks and Learning Systems.* — 2018. — Vol. 29, No. 5. — P. 1539–1549.
3. *Mondal, S., Ghommam, J., and Saad, M.* An Adaptive Full Order Sliding Mode Controller for Mismatched Uncertain Systems // *International Journal of Automation and Computing.* — 2017. — Vol. 14, No. 2. — P. 191–201.
4. *Liu, Y.J.* Neural Network Control-based Adaptive Learning Design for Nonlinear Systems with Full-state Constraints // *IEEE Trans. on Neural Networks and Learning Systems.* — 2016. — Vol. 27, No. 7. — P. 1562–1571.
5. *Zhao, Z.* Neural Network Based Boundary Control of a Vibrating String System with Input Deadzone // *Neurocomputing.* — 2018. — Vol. 275. — P. 1021–1027.
6. *Sun, X.* High-performance Control for a Bearingless Permanent-magnet Synchronous Motor Using Neural Network Inverse Scheme Plus Internal Model Controllers // *IEEE Trans. on Industrial Electronics.* — 2016. — Vol. 63, No. 6. — P. 3479–3488.
7. *Wang, T.* Network-based Fuzzy Control for Nonlinear Industrial Processes with Predictive Compensation Strategy // *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems.* — 2017. — Vol. 47, No. 8. — P. 2137–2147.
8. *Wang, N., Sun, J.C., Er, M.J.* Tracking-error-based Universal Adaptive Fuzzy Control for Output Tracking of Nonlinear Systems with Completely Unknown Dynamics // *IEEE Trans. on Fuzzy Systems.* — 2018. — Vol. 26, No. 2. — P. 869–883.
9. *Ullah, N.* Fractional order control of static series synchronous compensator with parametric uncertainty // *IET Generation, Transmission & Distribution.* — 2017. — Vol. 11, No. 1. — P. 289–302.
10. *Da Silva, F.D.C., De Oliveira, J.B., De Araujo, A.D.* Robust Interval Adaptive Pole-placement Controller Based on Variable Structure Systems Theory // *Proc. of ICSEng.* — Las Vegas, 2017. — P. 45–54.
11. *Wiboonjaroen, W., Sooknuan, T., Thumma, M.* Robust Pole Placement by State-Pi Feedback Control for Interval Plants // *Proc. Computing Conf.* — London, 2017. — P. 1350–1356.
12. *Dincel, E., Bhattacharyya, S.P.* Robustness and Fragility of High Order Controllers: A Tutorial // *Proc. of Conf. on Control Applications.* — Buenos Aires, 2016. — P. 191–202.
13. *Nesenchuk, A.A.* A Method for Synthesis of Robust Interval Polynomials Using the Extended Root Locus // *Proc. of ACC.* — Seattle, 2017. — P. 1715–1720.
14. *Chursin, Yu., Sonkin, D., Sukhodoev, M., Nurmuhametov, R.* Control System for an Object with Interval-given Parameters: Quality Analysis Based on Leading Coefficients of Characteristic Polynomials // *International Review on Automatic Control.* — 2018. — Vol. 11, No. 4. — P. 203–207.
15. *Senol, B., Yeroglu, C.* Robust Stability Analysis of Fractional Order Uncertain Polynomials // *Proc. of the 5th IFAC Workshop on Fractional Differentiation and its Applications.* — Nanjing, 2012. — P. 1–6.



16. Egorov, A.V., Cuvas, C., Mondie, S. Necessary and Sufficient Stability Conditions for Linear Systems with Pointwise and Distributed Delays // *Automatica*. — 2017. — Vol. 80. — P. 218–224.
17. Вадутов О.С., Гайворонский С.А. Применение реберной маршрутизации для анализа устойчивости интервальных полиномов // *Известия Академии наук. Теория и системы управления*. — 2003. — № 6. — С. 7–12. [Vadutov, O.S., Gaivoronskiy, S.A. Primenenie rebernoi marshrutizatsii dlya analiza ustoichivosti interval'nykh polinomov // *Izvestiya Akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*. — 2003. — № 6. — S. 7–12. (In Russian)]
18. Niamsup, P., Phat, Vu.N. Robust Finite-time H_∞ Control of Linear Time-varying Delay Systems with Bounded Control via Riccati Equations // *International Journal of Automation and Computing*. — 2018. — Vol. 15, No. 3. — P. 355–363.
19. Chen, Z., Pan, Y.J., Gu, J. Integrated Adaptive Robust Control for Multilateral Teleoperation Systems under Arbitrary Time Delays // *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. — 2016. — Vol. 26, No. 12. — P. 2708–2728.
20. Ma, H. Neural-network-based Distributed Adaptive Robust Control for a Class of Nonlinear Multiagent Systems with Time Delays and External Noises // *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. — 2016. — Vol. 46, No. 6. — P. 750–758.
21. Hu, C. Desired Compensation Neural Network Adaptive Robust Control of an Industrial Linear Motor Motion System with Comparative Experimental Investigation // *Proc. of ICIA*. — Galle, 2016. — P. 479–484.
22. Wang, N. Adaptive Robust Online Constructive Fuzzy Control of a Complex Surface Vehicle System // *IEEE Trans. on Cybernetics*. — 2016. — Vol. 46, No. 7. — P. 1511–1523.
23. Touijer, N., Kamoun, S. Robust Self-tuning Control Based on Discrete-time Sliding Mode for Auto-regressive Mathematical Model in the Presence of Unmodelled Dynamics // *International Journal of Automation and Computing*. — 2016. — Vol. 13, No. 3. — P. 277–284.
24. Khozhaev, I.V., Gayvoronskiy, S.A. Synthesis of a PID-controller of a Trim Robust Control System of an Autonomous Underwater Vehicle // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2016. — Vol. 124, No. 1. — P. 1–6.
25. Gayvoronskiy, S.A., Ezangina, T.A., Khozhaev, I.V. Analysis and Synthesis of Dual Mode Control Systems of a Tethered Descent Undersea Vehicle // *Proc. of OCEANS 2016*. — Shanghai, 2016. — P. 1–8.
26. Воронов А.А. Основы теории автоматического управления: Автоматическое регулирование непрерывных систем: 2-е изд., перераб. — М.: Энергия, 1980. — 312 с. [Voronov, A.A. Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya: Avtomaticheskoe regulirovanie nepreryvnykh sistem: 2-e izd., pererab. — M.: Energiya, 1980. — 312 s. (In Russian)]

Статья представлена к публикации членом редколлегии М.В. Хлебниковым.

Поступила в редакцию 19.01.2019, после доработки 26.07.2019.
Принята к публикации 4.09.2019.

Хожяев Иван Валерьевич — аспирант, ✉ khozhaev.i@gmail.com,

Гайворонский Сергей Анатольевич — канд. техн. наук,
✉ saga@tpu.ru,

Езангина Татьяна Александровна — канд. техн. наук,
✉ eza-tanya@yandex.ru,

Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

ADAPTIVE-ROBUST STABILIZATION OF INTERVAL CONTROL SYSTEM QUALITY ON A BASE OF DOMINANT POLES METHOD

I.V. Khozhaev[#], S.A. Gayvoronskiy, T.A. Ezangina

Tomsk Polytechnic University, Russia

[#] ✉ khozhaev.i@gmail.com

Abstract. The paper is dedicated to a development of methods of synthesizing linear adaptive-robust controllers of low order, which allow providing constant values of control quality indices. To stabilize systems' dynamics, it is proposed to place allocation areas of system poles according to pole dominance principle. Dominant poles allocation in certain points of complex plane is reached by adjusting some of controller parameters; reduction of other poles' influence on the control quality is reached by choosing constant values for other parameters of the controller. The paper proposes the synthesis method combining advantages of adaptive and robust approach to synthesizing control systems with interval parameters. It is noted that to apply the method proposed, it is necessary to obtain linear mathematical model of the system in the form of characteristic polynomial with integral coefficients and to adjust the parameters of controller, it is necessary to obtain transient values of interval parameters.

Keywords: adaptive control, robust control, interval parameters, parametric uncertainty, synthesis, simulation modeling.

Funding. The work is performed with financial support of Russian Science Foundation (grant No. 18-79-00264).

ПРИМЕНИМОСТЬ БАЗОВЫХ МЕХАНИЗМОВ ОРГАНИЗАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ КОМПЛЕКСНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ¹

А.А. Широкий

Аннотация. Исследована применимость известных механизмов управления организационными системами для управления комплексной деятельностью (КД). Для этого экспертно установлено соответствие между различными механизмами управления и теми фазами, стадиями и этапами КД, на которых они могут и/или должны применяться, проанализирована полнота множества существующих механизмов управления. Отмечено, что такая систематизация позволяет при управлении той или иной конкретной деятельностью оперативно выбирать и применять адекватные механизмы управления. Сделан вывод о том, что механизмы организационного управления в целом могут и должны применяться для управления КД. Указано, что КД включает в себя организации в виде субъектов деятельности и относится к более широкому классу объектов, поэтому набор инструментов управления КД известными механизмами управления организациями не исчерпывается — продвинутые этапы КД, относящиеся к конкретизации деятельности, покрыты механизмами существенно лучше, чем начальные, где осуществляется проектирование деятельности.

Ключевые слова: комплексная деятельность, этапы комплексной деятельности, механизмы управления.

ВВЕДЕНИЕ

Задачи управления организациями рассматриваются во множестве работ с различных позиций — экономики и менеджмента, социологии и психологии, математики и информатики и др. Неоднократно предпринимались попытки теоретически осмыслить и обобщить практику принятия управленческих решений. Управленческая деятельность — частный случай *деятельности* как таковой (под деятельностью, следуя работе [1], будем понимать целенаправленную активность человека). В связи с этим логично рассмотреть вопрос об управлении деятельностью вообще.

За время развития наук об управлении сформировался объемный пул «лучших практик» — частных примеров успешных решений задач управления, систематизированных в рамках современного менеджмента. Такая систематизация позволила сформулировать типовые управленческие задачи —

обеспечение необходимой мотивации исполнителей, согласованную с ними выработку управленческих решений, задачу рационального распределения ограниченных ресурсов в условиях неопределенности и др. Поиск оптимальных решений таких задач привел к созданию специализированных математических моделей. Разработкой и исследованием таких моделей занимается теория управления организационными системами (ТУОС) [2]. Одним из наиболее важных практических результатов разработки ТУОС стали формализованные процедуры принятия управленческих решений — механизмы управления.

В основе каждого механизма/процедуры лежит одна или несколько математических моделей, на входе этой процедуры — множество возможных действий подчиненного и внешняя ситуация, на выходе — конкретное управленческое решение. По сравнению с лучшими практиками механизмы управления обладают двумя важными преимуществами. Во-первых, выбор механизма управления всегда происходит осознанно — путем сопоставления условий внешней среды и специфики управляемой системы с ограничениями соответствующими

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-10609).



шей математической модели. Во-вторых, эффективность применения того или иного механизма управления можно оценить количественно (например, как значение целевой функции управляющего органа — Центра). Таким образом, применение этого инструмента увеличивает качество и обоснованность управленческих решений — как минимум, благодаря априорному отклонению тех из них, что заведомо не сработают или не дадут ожидаемого эффекта.

В книге [3] рассматривается обобщенная модель *комплексной деятельности* (КД), выделяются ее общие фазы, стадии и этапы. Цель настоящей работы состоит в экспертном установлении соответствия между различными механизмами управления и теми фазами, стадиями и этапами КД, на которых они могут и/или должны применяться. С точки зрения практики подобная систематизация позволяет при управлении конкретной КД оперативнее выбирать и применять адекватные механизмы управления, а с точки зрения внутренней логики развития ТУОС и методологии КД — выявлять как «неподдержанные» инструментарием организационного управления этапы КД, так и перечислять «недостающие» механизмы управления и также ставить задачи их разработки и исследования.

Структура работы. В § 1 дана общая постановка задачи управления комплексной деятельностью. Проанализированы отношения между ее структурными элементами, этапами их жизненного цикла, поставлены вопросы о применимости к ним механизмов управления. В § 2 приведены возможные классификации механизмов управления. В § 3 рассмотрен вопрос, какие механизмы управления следует применять управляющему субъекту — Центру — на тех или иных этапах своей деятельности для управления различными этапами деятельности управляемого субъекта — Агента. В § 4 обсуждается полнота множества существующих механизмов управления и возможные «пробелы» в них.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Центральным элементом методологии КД является понятие структурного элемента деятельности (СЭД), который инкапсулирует в себя как *субъекта* и предмет деятельности, так и ее целеполагание, технологию и оценивание результатов. Помимо этого, в СЭД включены требования, нормы, принципы и иные ограничения деятельности, накладываемые на нее внешней средой. Структурный элемент деятельности с детерминированной структурой и технологией деятельности называется *регулярным* [3].

Комплексная деятельность отличается тем, что не может быть описана одним регулярным

СЭДом — ее элементы образуют многоуровневую фрактальную структуру, у которой СЭДы на нижнем уровне иерархии являются регулярными. Остальные элементы подразумевают обработку субъектом событий различных типов неопределенности с задействованием для ее разрешения других «готовых» СЭДов (репликативная деятельность) или даже синтезом новых (креативная деятельность). Описывающие такую деятельность СЭДы называются *репликативными* и *креативными* соответственно [3]. Например, реагируя на неопределенность спроса, субъект выбирает свое действие (регулярный СЭД) в рамках ранее созданной технологии деятельности. В более сложных случаях субъекту, возможно, придется синтезировать новую технологию деятельности или же всю деятельность в целом.

Отметим, что действия субъекта в ответ на неопределенность целенаправленны и подразумевают анализ внешней среды. Эти действия являются элементами управленческой деятельности (*управление* — совокупность целенаправленных действий, включающая в себя оценку ситуации и состояния объекта управления, выбор управляющих воздействий и их реализацию [4]). Таким образом, любая креативная (а значит, комплексная) деятельность субъекта несет в себе элементы управления некоторой организационно-технической системой (ОТС), в качестве которой может выступать и сам субъект.

В общем случае комплексная деятельность зарождается в момент осознания субъектом некоторой новой потребности. Соответствующий ей креативный СЭД начинает свой жизненный цикл (ЖЦ) в виде информационной модели «в памяти» субъекта¹ деятельности и в течение ЖЦ проходит три фазы — проектирования, реализации и рефлексии, которые, в свою очередь, можно разбить на 12 этапов [3]:

- 1) фиксация спроса и осознание потребности;
- 2) формирование логической модели;
- 3) проверка готовности технологии и достаточности ресурсов;
- 4) создание причинно-следственной модели;
- 5) создание технологии нижестоящих элементов;
- 6) формирование/модернизация ресурсов;
- 7) календарное и ресурсное планирование;
- 8) оптимизация;
- 9) назначение субъектов и определение ответственности;
- 10) назначение ресурсов;
- 11) выполнение действий и получение результата;

¹ В общем случае субъектом является организационно-техническая система, поэтому под «памятью» мы понимаем и любой носитель информации.

12) оценивание результата и рефлексия.

Каждому из этих этапов можно поставить в соответствие отдельный СЭД, строго регулярный для 11-го этапа и, вполне вероятно, креативный для остальных. Говорить о полном описании жизненного цикла КД можно лишь тогда, когда для каждого этапа создана иерархическая структура СЭДов, оканчивающаяся на «нижнем» уровне регулярными элементами. Такие элементы содержат в себе все необходимые компоненты технологии деятельности (синтезированы ранее) и не содержат неопределенности. Поэтому для их выполнения нужно просто выполнять элементарные операции по заданному алгоритму.

То, каким будет этот алгоритм, зависит от результатов выполнения вышестоящих СЭДов, каждый из которых включает в себя собственное целеполагание (подцель цели вышестоящего СЭДа) и технологию деятельности. Субъекты этих СЭДов также в общем случае различны, а поскольку мы полагаем их активными, то для достижения успешного результата КД необходимо решить задачи согласования интересов участников ОТС и управления технологий их деятельности.

В ТУОС описано более сорока типовых процедур принятия управленческих решений — механизмов управления. Каждый механизм призван решить частную задачу управления. Учитывая отмеченную ранее связь КД и управленческой деятельности, а также то, что СЭДы образуют иерархическую структуру, рассматриваемый нами элемент деятельности (назовем его условно «А-СЭД») в общем случае порождает и управляет подчиненными ему элементами деятельности (Н-СЭДами), а сам подчиняется некоторому вышестоящему элементу (В-СЭДу), можно сформулировать следующие два вопроса.

- Какие механизмы управления субъект А-СЭДа может/должен применять по отношению к субъектам Н-СЭДов на тех или иных этапах своей деятельности (при этом субъект А-СЭДа выступает в роли Центра)?
- Какие механизмы управления со стороны субъекта В-СЭДа могут/должны применяться для управления поведением субъекта А-СЭДа на тех или иных этапах деятельности последнего (при этом субъект А-СЭДа выступает в роли Агента)?

Ответы на эти вопросы позволят лицу, принимающему решения, применять управляющие воздействия осознанно (а не на основании только лишь интуиции и предшествующего опыта, зачастую не полностью релевантного). При этом выбранное решение будет заведомо результативно — таким образом, исключается возможность выбора неэффективных механизмов и, следовательно, непродуктивные затраты ресурсов. Кроме того, со-

гласованные технологии деятельности могут порождать дополнительную ценность («синергетический эффект») — это явление может проявляться при агрегировании различных базовых механизмов на различных уровнях КД.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕХАНИЗМОВ УПРАВЛЕНИЯ

Чтобы соотнести разработанные в рамках ТУОС «базовые» механизмы управления организационными системами (ОС) с этапами ЖЦ структурных элементов деятельности (здесь и далее, если не оговорено особо, мы исключаем из рассмотрения регулярные СЭДы), опишем возможные основания классификации механизмов управления. Часть из них вытекает из особенностей управляемой системы (масштаб системы, число центров и агентов, число уровней иерархии и др.), другие разделяют механизмы по их внутренней структуре или применяемому математическому аппарату (базовые/комплексные, теоретико-игровые/оптимизационные и др.). Для решения поставленной задачи будем применять те из них, что позволяют получать конечное число классов, а именно:

- *метод моделирования* — основу механизма управления может составлять решение задачи оптимизации или решение иерархической игры агента(ов)-подчиненного(ых) с Центром-руководителем;
- *предмет управления* — сам субъект (состав и структура ОТС), его стимулирование, ограничения и нормы деятельности субъекта и его информированность о них;
- *функция управления* — в менеджменте их традиционно (см., например, книгу [5]) выделяют четыре: планирование, организация, мотивация и контроль;
- *задача управления* — в структуре управленческой деятельности комплекс задач включает в себя типовые элементы (см., например, учебное пособие [6]):
 - мониторинг и анализ текущего состояния ОТС;
 - прогноз развития ситуации;
 - целеполагание;
 - выбор технологии деятельности;
 - планирование и распределение ресурсов;
 - стимулирование (мотивация);
 - контроль и оперативное управление;
 - анализ и улучшение деятельности, рефлексия.

Приведенные основания классификаций не являются разделяющими (за исключением метода моделирования) — многие эффективные базовые механизмы изначально синтезировались для решения связанных управленческих задач.

В работах, посвященных ТУОС, описан пул типовых механизмов управления, которые мы будем



называть базовыми. Базовые механизмы управления ОС подразумевают выполнение субъектом действий по оптимизации деятельности (оптимизационные механизмы) либо действий по управлению подчиненными (теоретико-игровые механизмы). В табл. 1 приведен перечень этих механизмов, сгруппированных по видам (методам) управления с указанием их принадлежности к оптимизационному или игровому классу. Предметы управления (в заголовке столбца), соответствующие механизму управления в строке, отмечены символом «×».

Отметим, что семейство механизмов информационного управления является своего рода надстройкой над механизмами управления составом ОТС, ограничениями деятельности агентов и их стимулированием и применяются в тех случаях, когда управление информированностью агентов позволяет получить существенный дополнительный эффект. Например, управление информированностью экспертов позволяет Центру получать результаты активной экспертизы, близкие к желаемым.

3. МЕХАНИЗМЫ УПРАВЛЕНИЯ И КОМПЛЕКСНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

3.1. Деятельность управляющего субъекта

Рассмотрим сначала вопрос о применимости базовых механизмов управления организационными системами на этапах деятельности управляю-

щего субъекта. Для этого соотнесем этапы КД и решаемые в ходе их выполнения типовые задачи управления (табл. 2).

В строках табл. 3 классы базовых механизмов управления ОС соотнесены с этапами деятельности субъекта А-СЭДа. Символ «×» в клетках таблицы означает применимость класса механизмов, соответствующего строке, на этапе, соответствующем столбцу.

На первых шести этапах деятельности субъекта активность подчиненных отсутствует. Поэтому субъект не может применять теоретико-игровые механизмы за отсутствием второго игрока, а может применять лишь механизмы оптимизации. На этапе 1 субъект наблюдает состояние ОТС (предмета деятельности) и ее операционного окружения. В случае возникновения внешнего спроса на модификацию/синтез новой деятельности субъект его фиксирует и принимает решение о начале деятельности по удовлетворению спроса — осознает потребность в КД. Задачи оптимального мониторинга и прогноза часто рассматриваются в литературе (см., например, работы [10, 11]), но ТУОС механизмов оптимизации такой деятельности почти не предлагает.

На этапе 2 субъект изучает возможность достижения требуемого результата КД и выбирает подходящую технологию с помощью механизмов институционального управления. Если субъект также определил промежуточные результаты и типы

Таблица 2

Этапы комплексной деятельности управляющего субъекта и возникающие в ходе их выполнения типовые управленческие задачи

№	Этап комплексной деятельности	Типовые управленческие задачи
1	Фиксация спроса и осознание потребности	Мониторинг и анализ текущего состояния ОТС; прогноз развития ситуации
2	Формирование логической модели	Целеполагание
3	Проверка готовности технологии и достаточности ресурсов	Выбор технологии деятельности; планирование и распределение ресурсов
4	Создание причинно-следственной модели	Выбор технологии деятельности
5	Создание технологии нижестоящих элементов	
6	Формирование/модернизация ресурсов	Планирование и распределение ресурсов
7	Календарное и ресурсное планирование	
8	Оптимизация	
9	Назначение субъектов и определение ответственности	Планирование и распределение ресурсов; стимулирование (мотивация)
10	Назначение ресурсов	
11	Выполнение действий и получение результата	Контроль и оперативное управление
12	Оценивание результата и рефлексия	Анализ и улучшение деятельности, рефлексия

подчиненных субъектов, то он может конкретизировать модель, применяя механизмы управления структурой.

На 3-м этапе субъект должен убедиться в достаточности ресурсов для реализации выбранной технологии. Для этого необходимо выявить, с какими ограничениями последняя может применяться, и затем привести ее к требуемому виду — оптимизировать. Для решения этой задачи подходят механизмы институционального управления.

Четвертый этап подразумевает конкретизацию технологической цепочки до уровня регулярных СЭДов, для чего необходимо построить их иерархию. Для решения этой задачи применяются механизмы управления структурой и механизмы оценки и контроля.

На этапе 5 создания технологии нижестоящих элементов субъект должен окончательно определить типы подчиненных субъектов, их иерархию и ограничения деятельности с помощью механизмов

управления составом и структурой ОТС, а также механизмов институционального управления.

На 6-м этапе субъект формирует пул ресурсов для реализации технологии и с помощью механизмов институционального управления оптимизирует ее в соответствии с полученными ограничениями на ресурсы.

На этапе 7 календарно-ресурсного планирования начинается конкретизация деятельности и становятся актуальны теоретико-игровые механизмы, поскольку в деятельность субъекта вступают подчиненные. Здесь применимы все механизмы институционального управления, а также надстраиваемые над ними механизмы информационного управления.

Для оптимизации деятельности (этап 8) подходят все механизмы, имеющие оптимизационную природу.

На этапе 9 назначения субъектов и определения ответственности субъект решает задачу о назначении. Для этого подходят механизмы управле-

Таблица 3

Применимость групп «базовых» механизмов организационного управления на этапах комплексной деятельности управляющего субъекта

Предмет управления	Функция управления	Метод моделирования — оптимизационный (О) / теоретико-игровой (И)	Номер этапа КД											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Состав ОТС	Планирование	И									×			
	Организация	И									×			
		О					×	×		×	×			
	Мотивация	И									×			
Структура ОТС	Организация	И									×			
	Мотивация	О		×		×	×			×	×			
Ограничения и нормы деятельности участников ОТС (институциональное управление)	Организация	И							×			×		
		И							×			×		
		О		×	×		×	×	×	×				
	Мотивация	И							×			×		
	Оценка и контроль	И							×		×	×	×	
Стимулирование участников ОТС	Организация	О	×	×	×	×	×		×	×	×		×	×
	Планирование	И										×		
	Мотивация	И										×		
	Оценка и контроль	И									×	×	×	
Информированность участников ОТС	Планирование	И							×			×		
	Организация	И										×		
	Мотивация	И										×		
		И							×		×	×	×	
	Оценка и контроль	О	×	×	×	×	×		×	×	×	×	×	×



ния составом и структурой организации, а также все механизмы оценки и контроля.

Наконец, при распределении ресурсов (этап 10) применимы все механизмы стимулирования, теоретико-игровые механизмы институционального управления (для обеспечения соблюдения подчиненными ограничений внешней среды), а также механизмы информационного управления.

На этапе 11 выполнения деятельности и получения результата выполняются элементарные операции в соответствии с разработанной на этапах 3–10 КД технологией. Субъект КД на этом этапе осуществляет контроль и регулирование действий (как своих, так и подчиненных субъектов). В случае возникновения ситуации неопределенности, делающей выполнение деятельности в соответствии с заданной технологией невозможным, субъект должен прервать выполнение СЭДа и вернуться к одному из предшествующих этапов. Релевантными механизмами на этом этапе служат механизмы оценки и контроля.

На финальном 12-м этапе — оценивании результата и рефлексии — субъект должен сравнить полученный результат с запланированным и выявить возможные недостатки в технологии деятельности. Для этого ему следует применять механизмы оценки и контроля.

Предложенное распределение механизмов по этапам КД является естественным в том смысле, что на каждом этапе КД субъект сталкивается со вполне определенными классами управленческих задач, для решения которых, в свою очередь, механизмы организационного управления и разрабатывались.

3.2. Деятельность управляемого субъекта

Отметим, что синтез новых механизмов управления и/или подбор их параметров является креативной деятельностью субъекта по синтезу технологии деятельности — своей и подчиненных ему СЭДов. В то же время применение уже синтезированного механизма на этапах КД представляет собой не креативную, а репликативную деятельность. Например, менеджер по работе с клиентами может предложить потенциальному покупателю некоторые предпочтения по своему выбору, но из списка, утвержденного руководителем отдела (вышестоящий СЭД). Поэтому в процессе синтеза технологии и, в частности, при выборе управляющих воздействий на подчиненных, субъекту следует определить типы их СЭДов.

Регулярный Н-СЭД не декомпозируется на нижестоящие СЭДы (а только на элементарные операции), и его субъект принимает только одно решение — участвовать или не участвовать в КД А-СЭДа, т. е. выступает только в роли агента. Регу-

лярность его деятельности согласно книге [3, п. 4.2] предполагает знание субъектом А-СЭДа и функции затрат, и технологической функции агента. Такая «полная информированность» на практике может возникать, в частности, как следствие «выравнивающего действия рынка». Например, заказчик знает рыночную стоимость стандартного продукта/услуги. И ему в этом случае не важны технология/затраты конкретного исполнителя — он в любом случае найдет того, кто предложит ему продукт на рыночных условиях. Это позволяет субъекту А-СЭДа независимо от информированности агента сформировать механизм управления, при котором у последнего «останется» бинарное действие (соглашаться осуществлять деятельность и обеспечивать требуемый результат или нет).

Деятельность субъекта Н-СЭДа любого иного вида несет в себе элемент креативности, поскольку он осуществляет выбор механизмов управления, выступая в роли Центра по отношению к нижестоящим субъектам. Поэтому субъект А-СЭДа, выбирая механизмы управления субъектами нерегулярных Н-СЭДов, имеет в виду, что последние осуществляют «комплексное» действие (как минимум, из-за наличия своих собственных подчиненных). Этот выбор, в частности, зависит от того, на каком этапе своей КД находятся подчиненные субъекты. Предлагаемые соответствия возможных управляющих воздействий субъекта А-СЭДа этапам КД субъектов нерегулярных Н-СЭДов представлены в табл. 4.

При рассмотрении вопроса о влиянии механизмов управления на деятельность управляемого субъекта оптимизационные механизмы следует исключить из рассмотрения. Действительно, их применение не оказывает прямого влияния на то, *как именно* субъект будет строить свою деятельность, но задает ограничения, с которыми субъект может лишь согласиться (и выполнить работу) или отказаться от выполнения СЭДа. Кроме того, мы не будем рассматривать применение механизмов оценки и контроля по отношению к каждому этапу КД, поскольку, с одной стороны, оценке и контролю должен подвергаться результат выполнения каждого этапа, а с другой — знание об используемом механизме контроля мало влияет на деятельность управляемого субъекта.

На 1-м этапе — фиксации спроса и осознания потребности — субъект должен понять, зачем ему вообще нужно заниматься соответствующей деятельностью. Задача вышестоящего субъекта — Центра на этом этапе — мотивировать управляемого субъекта к формированию своей цели, согласованной с целью Центра. На решение этой задачи ориентировано все семейство теоретико-игровых механизмов управления.

На 2-м и 3-м этапах управляемый субъект осознает, в чем именно будет заключаться его деятельность, строит собственное дерево целей и определяет готовность технологии их достижения с учетом существующих ограничений. На этих этапах Центр может сообщить субъекту ограничения деятельности, используя механизмы институционального управления. В то же время механизмы стимулирования здесь не теряют актуальности — будучи примененными к управляемому субъекту, они задают для него ограничения ресурсов. Также Центр может использовать механизмы информационного управления, настраиваемые над механизмами стимулирования и институционального управления.

Этап 4 создания причинно-следственной модели управляется теоретико-игровыми механизмами управления структурой.

На этапе 5 создания технологии нижестоящих элементов субъект восприимчив к механизмам с функциями планирования и организации (см. также табл. 1).

На 6-м этапе — формирования/модернизации ресурсов — управляемый субъект формирует ресурсы сообразно устанавливаемым Центром ограничениям, поэтому будет реагировать на тот же набор механизмов, что и на этапах 2 и 3.

На этом управляемый субъект завершает синтез деятельности и приступает к ее конкретизации. На этапах 7 и 8 — календарного и ресурсного пла-

нирования и оптимизации соответственно — он должен построить технологический граф и привести технологию в соответствие с установленными Центром ограничениями. Следовательно, субъект будет реагировать на механизмы, задающие ограничения, — институционального управления и стимулирования (а также связанные с ними механизмы информационного управления).

Этап 9 назначения субъектов и определение ответственности выглядит слабо покрытым механизмами организационного управления потому, что все необходимые ограничения уже были учтены субъектом ранее, при синтезе технологии деятельности, планировании и оптимизации. Субъект В-СЭДа может дополнительно влиять на выбор субъектом А-СЭДа подчиненных с помощью механизмов управления составом.

На финальном этапе 10 стадии формирования технологии — этапе назначения ресурсов — субъект должен распределить полученные от вышестоящего субъекта ресурсы между субъектами подчиненных СЭДов, т. е. фактически решить задачу оптимального распределения ресурсов. Поэтому данный этап управляется теми же инструментами, что и этап оптимизации деятельности.

Выполнение действий и получение результата осуществляется субъектом в рамках ранее зафиксированных механизмов (результаты «подставляются» в процедуры принятия решений вышестоящим СЭДом, т. е. опосредовано на этом этапе

Таблица 4

Применимость групп «базовых» теоретико-игровых механизмов организационного управления на этапах КД управляемого субъекта

Предмет управления	Функция управления	Номер этапа КД											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Состав	Планирование	×				×				×			
	Организация	×				×				×			
	Мотивация	×								×			
Структура	Организация	×			×	×							
	Мотивация	×			×								
Ограничения и нормы деятельности участников ОТС	Планирование	×	×	×		×	×	×	×		×		
	Организация	×	×	×		×	×	×	×		×		
	Мотивация	×	×	×			×	×	×		×		
Стимулирование участников ОТС	Планирование	×	×	×		×	×	×	×		×		×
	Организация	×	×	×		×	×	×	×		×		×
	Мотивация	×	×	×			×	×	×		×		×
Информированность участников ОТС	Планирование	×	×	×		×	×	×	×		×		
	Организация	×				×				×			
	Мотивация	×	×	×			×	×	×		×		×



«работают» все применяемые по отношению к данному субъекту механизмы управления) и подвергается регулированию и контролю.

Наконец, на оценку субъектом результата и его рефлексии над ним можно влиять, применяя к нему механизмы стимулирования.

4. АНАЛИЗ ПОЛНОТЫ КОМПЛЕКСА МЕХАНИЗМОВ

Механизмы организационного управления в целом могут и должны применяться для решения задач управления комплексной деятельностью. В то же время КД включает в себя организации в виде субъектов деятельности и потому представляет более широкий класс объектов. В связи с этим можно говорить о том, что набор инструментов управления КД известными механизмами управления организациями не исчерпывается.

Этап фиксации спроса и осознания потребности практически не покрывается механизмами организационного управления. Однако на этом этапе чаще всего решаются задачи мониторинга и прогноза, которые хорошо описаны в смежной литературе.

Сложнее дело обстоит с этапами КД 2–6, которые подразумевают работу с информационной моделью деятельности, т. е. решение задач оптимизации. Таких механизмов намного меньше, чем теоретико-игровых. Особенно малочисленны механизмы для применения на этапе формирования ресурсов. В самом деле, большая часть механизмов управления позволяет оптимально распределить имеющиеся в распоряжении субъекта ресурсы, но никак не помогает ему их находить. В дальнейших исследованиях следует уделить больше внимания формированию пулов ресурсов, включая задачи оценки источников ресурсов, прогнозирования динамики поступления ресурсов, управления жизненными циклами пулов ресурсов.

Отсутствуют механизмы для получения оптимальной в каком-то смысле декомпозиции целей и задач (традиционно применяемый на этих этапах язык описания бизнес-процессов не подразумевает оптимизации). Эта задача должна решаться с помощью механизмов планирования, но оптимизационных механизмов в этой группе пока нет. Также слабо поддержан механизмами этап оценивания результата и рефлексии.

На этапах конкретизации деятельности имеющихся механизмов, на первый взгляд, достаточно. Тем не менее, можно заметить, что механизмы институционального управления сфокусированы на ресурсах, оставляя без внимания ограничения технологии деятельности. При этом хорошо известно, что внедрение в работу средств повышения дисциплины, перекрестного контроля, технологичес-

ких карт и инструкций эффективно снижает неопределенность и, как следствие, улучшает результат деятельности. Представляется целесообразным формализовать такие элементы технологии деятельности в виде математических моделей.

Большая часть «базовых» механизмов управления применима к этапам КД, относящимся к стадии формирования технологии. Стадии же фиксации спроса и осознания потребности, а также целеполагания и структурирования целей и задач покрыты механизмами управления довольно слабо. Это, по всей видимости, связано с тем, что технология деятельности как предмет управления «понятнее», чем фиксация спроса и целеполагание. В то же время представляется целесообразным работать над созданием «мягких» механизмов управления, ориентированных на преобразование агентом цели принципала в свою собственную. Такой подход позволяет делегировать агенту больше прав, не опасаясь при этом понести издержки из-за некорректных действий последнего. Результатом применения таких механизмов будет снижение издержек на содержание системы управления.

Другой путь к расширению пула механизмов управления лежит в направлении включения в рассмотрение новых внутренних свойств управляемых объектов и систем. Например, введение структур информированности привело к появлению совершенно нового класса задач, решаемых механизмами управления на основе рефлексивных игр [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенное в работе «распределение» механизмов управления по этапам комплексной деятельности позволяет лицу, принимающему решения, быстро исключать из рассмотрения неэффективные альтернативы. Руководителю достаточно определить этапы комплексной деятельности, на котором находится он сам и управляемый им субъект — и затем выбрать один или несколько работоспособных механизмов из весьма краткого их списка. Такой подход не только экономит ресурсы руководителя, но и позволяет исключить принятие заведомо неэффективных решений.

В смысле полноты вряд ли можно говорить о возможности формирования закрытого списка механизмов управления. В то же время, для типичных управленческих задач, решаемых на различных этапах комплексной деятельности, уже сейчас предложены механизмы, обеспечивающие высокий уровень результатов деятельности агентов активной системы. Адаптация их к сложившемуся операционному окружению, а также учет дополнительных факторов (отраслевой специфики, гео-

графии, локальной социально-экономической обстановки) при моделировании функций затрат и технологических функций агентов позволяет еще больше повысить эффективность управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков Д.А. Управление проектами: организационные механизмы. — М.: ПМСОФТ, 2007. — 140 с. [Novikov, D.A. Upravlenie proektami: organizatsionnye mekhanizmy. — Moscow: PMSOFT, 2007. — 140 s. (In Russian)]
2. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. — 3-е изд. — М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2012. — 604 с. [Novikov, D.A. Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami. 3-e izd. — Moscow: Izdatel'stvo fiziko-matematicheskoi literatury, 2012. — 604 s. (In Russian)]
3. Белов М.В., Новиков Д.А. Методология комплексной деятельности. — М.: Ленанд, 2018. — 320 с. [Belov, M.V., Novikov, D.A. Metodologiya kompleksnoi deyatel'nosti. — Moscow: Lenand, 2018. — 320 s. (In Russian)]
4. ГОСТ 34.003—90. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения. Дата введения 01.01.92. [GOST 34.003—90. Informatsionnaya tekhnologiya. Kompleks standartov na avtomatizirovannye sistemy. Avtomatizirovannye sistemy. Terminy i opredeleniya. Date of enactment: 01.01.92. (In Russian)]
5. Мескон М., Альберт М., Хедоури Ф. Основы Менеджмента (Management) / пер. Л.И. Евенко. — М.: Дело, 1997. — 704 с. [Meskon, M., Al'bert, M., Khedouri, F. Osnovy Menedzhmenta (Management) / per. L.I. Evenko. — Moscow: Delo, 1997. — 704 s. (In Russian)]
6. Механизмы управления: Мультифункциональное учебное пособие / под ред. Д.А. Новикова. — М.: УРСС, 2011. — 216 с. [Mekhanizmy upravleniya: Mul'tifunktsional'noe ucheb-

- noe posobie / pod red. D.A. Novikova. — Moscow: URSS, 2011. — 216 s. (In Russian)]
7. Галинская Е.В., Иващенко А.А., Новиков Д.А. Модели и механизмы управления развитием персонала. — М.: ИПУ РАН, 2005. — 68 с. [Galinskaya, E.V., Ivashchenko, A.A., Novikov, D.A. Modeli i mekhanizmy upravleniya razvitiem personala. — Moscow: IPU RAN, 2005. — 68 s. (In Russian)]
 8. Новиков Д.А. Математические модели формирования и функционирования команд. — М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2008. — 184 с. [Novikov, D.A. Matematicheskie modeli formirovaniya i funktsionirovaniya komand. — Moscow: Izdatel'stvo fiziko-matematicheskoi literatury, 2008. — 184 s. (In Russian)]
 9. Новиков Д.А. Сетевые структуры и организационные системы. — М.: ИПУ РАН, 2003. — 108 с. [Novikov, D.A. Setevye struktury i organizatsionnye sistemy. — Moscow: IPU RAN, 2003. — 108 s. (In Russian)]
 10. Principles of forecasting: a handbook for researchers and practitioners / Edited by J.S. Armstrong. — Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, 2001. — 849 p.
 11. Savioz, P., Blum, M. Strategic forecast tool for SMEs: how the opportunity landscape interacts with business strategy to anticipate technological trends // Technovation, — 2002. — Vol. 22 (2). — P. 91—100.
 12. Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г. Рефлексия и управление: математические модели. — М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2013. — 412 с. [Novikov, D.A., Chkhartishvili, A.G. Refleksiya i upravlenie: matematicheskie modeli. — Moscow: Izdatel'stvo fiziko-matematicheskoi literatury, 2013. — 412 s. (In Russian)]

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Н. Бурковым.

Поступила в редакцию 12.05.2019, после доработки 05.07.2019.
Принята к публикации 09.07.2019.

Широкий Александр Александрович — канд. физ.-мат. наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ shiroky@ipu.ru.

BASIC ORGANIZATIONAL CONTROL MECHANISMS APPLICABILITY AT DIFFERENT STAGES OF INTEGRATED ACTIVITY

A.A. Shirokii

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
✉ shiroky@ipu.ru

Abstract. The work done is devoted to the research of the applicability of the known mechanisms of organizational systems control for integrated activity (IA) management. For this purpose, the establishment is performed of the correspondence between the various control mechanisms and those phases, stages and steps of the IA on which they could and/or should be used; the completeness is analyzed of the set of existing control mechanisms. Such systematization allows to quickly select and apply an adequate control mechanism while managing the particular activity. The conclusion is made as a result of the work that the mechanisms of organizational control generally could and should be used to manage an integrated activity. However, IA comprises organizations as subjects of activity and therefore represents a wider class of objects. Therefore, the IA managing toolbox is not limited to known organizations' control mechanisms: the advanced IA stages related to the activity specification are covered with control mechanisms much better than the initial ones, when the activity design is performed.

Keywords: integrated activity, stages of integrated activity, control mechanisms.

Funding. The work is performed with financial support of Russian Science Foundation (grant No. 16-19-10609).

МЕТОД СВЯЗАННЫХ ПРОЕКЦИЙ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ МНОГОМЕРНЫХ ДАННЫХ

А.Н. Соломатин

Аннотация. Предложен метод связанных проекций, обеспечивающий визуализацию на плоскости многомерных данных в виде геометрических объектов — многоугольников и ломаных. К стандартным средствам визуализации многомерных данных добавлен еще один новый — введение неоднородности плоскости визуализации. Модель связанных проекций состоит из квадрантов одного размера, соединенных особым образом. Двумерные проекции многомерной точки, находящиеся в каждом квадранте, соединяются между собой, образуя многоугольники либо ломаные. Дан анализ существующих методов визуализации многомерных данных и приведен набор правил построения моделей связанных проекций. Исследованы некоторые количественные и алгебраические свойства введенных геометрических объектов. Перечислены основные достоинства метода и особенности его компьютерной реализации. Приведены особенности применения метода для визуализации многомерных матричных моделей при стратегическом планировании и визуализации многокритериальных альтернатив при решении задач многокритериальной оптимизации.

Ключевые слова: визуализация многомерных данных, метод связанных проекций, многоугольники и ломаные, стратегическое управление регионом, матричные модели, многокритериальная оптимизация.

ВВЕДЕНИЕ

Визуализация информации представляет собой одно из основных направлений современных исследований в области информационных технологий. Под компьютерной визуализацией понимается построение визуального геометрического образа на основании абстрактных представлений об объектах (процессах).

Известно, что визуальное представление информации более подходит для качественного анализа и более соответствует особенностям человеческой психики, чем символьное (линейное). Поэтому основные достоинства компьютерной визуализации заключаются в наглядности и целостности восприятия, лаконичном описании внутренних закономерностей данных и высокой скорости их интерпретации.

Последние годы компьютерная визуализация развивается бурными темпами, превращаясь в самостоятельную область научного знания, что связано как с прогрессом программно-аппаратных

средств машинной графики, так и с потребностями анализа огромных объемов информации.

Основы компьютерной визуализации рассматриваются в книге [1]. В работе [2] исследуются вопросы создания теории визуализации, проводится анализ компьютерных метафор и семиотический анализ визуализации в аспекте применения при проектировании визуальных систем. Формальные подходы к оценке визуальных текстов и эффективности визуализации, рассмотрение метафор визуализации как непрерывных отображений приводится в статье [3]. А в работе [4] исследуется подход к формализации визуализации на базе семиотического подхода с помощью теории категорий. Классификация методов визуализации по различным основаниям — области применения, уровням визуализации, методам представления информации и типу взаимодействия с пользователем, рассмотрена в статье [5].

Во многих областях науки и техники одними из наиболее часто рассматриваемых объектов исследования являются многомерные данные — различ-

ные объекты или процессы, характеризующиеся вектором значений своих свойств (всюду далее — многомерные объекты). Основная проблема их визуализации связана с ограниченностью человеческого зрения, которое не может воспринимать структуры размерностью более трех. Обзоры существующих методов визуализации многомерных данных приводятся в работах [6, 7], в первую очередь, с точки зрения визуализации многокритериальных альтернатив при многокритериальной оптимизации, а также в работе [8]. Популярная книга [9] является настоящим пособием по визуальным коммуникациям, прежде всего, в бизнесе, где описывается множество различных диаграмм, способы их выбора, построения и применения.

Существуют два основных направления визуализации многомерных данных — уменьшение размерности данных и визуализация данных с помощью различных графических метафор, включая такие средства, как положение на плоскости, цвет и его интенсивность, форма, размер и узор (способ закрашки) [5].

В работе [10] был предложен метод связанных проекций (МСП), обеспечивающий планарную визуализацию многомерных данных в виде различных геометрических объектов — многоугольников и ломаных. Новизна метода состоит в том, что к стандартным средствам визуализации многомерных данных добавляется еще один новый — введение неоднородности плоскости визуализации. Некоторые аспекты применения МСП при решении задач стратегического планирования приводятся в работах [11, 12], а при решении задач многокритериальной оптимизации — в работах [12, 13].

1. СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

В настоящее время обычно применяются следующие методы планарной визуализации многомерных данных [6, 7].

Радарные (лепестковые, сетчатые) диаграммы (рис. 1, а, см. третью страницу обложки). На плоскости OXY из центра координат проводятся оси по числу измерений (параметров) объекта; значения по каждому измерению откладываются на осях и соединяются между собой отрезками прямых, в результате чего образуются многоугольники — «радары». Метод дает возможность визуализировать объекты с большим числом измерений, очень нагляден, но не позволяет анализировать значительное число объектов и сравнивать объекты по парам параметров.

Звездные диаграммы (рис. 1, б). Они весьма похожи на радары, но каждая ось обрывается в месте отметки соответствующего значения, причем значения параметров не соединяются в многоугольный контур. Данный метод нагляден, позволяет

визуализировать теоретически неограниченное число измерений, но всего лишь для нескольких объектов и без сравнения по парам параметров.

Профили (рис. 1, в). По оси OX откладываются позиции различных параметров, по вертикальным параллельным осям одинаковой длины — значения по каждому параметру; отмеченные значения соединяются отрезками прямых. В результате объект изображается в виде ломаной, похожей на линейный график. Несмотря на наглядность, простоту и теоретически неограниченную размерность, а также возможности применения для решения задач многокритериальной оптимизации, метод не позволяет сравнивать объекты по парам параметров.

Матричные графики (рис. 1, г). При наличии n параметров формируется симметричная матрица $n \times n$ из пузырьковых диаграмм (двумерных проекций) для каждой пары параметров. Достоинства метода — теоретически неограниченное число объектов, значительные размерности, возможности сравнения объектов по каждой паре параметров, — нивелируются существенным недостатком — отсутствием единого визуального образа каждого объекта и трудностями визуального анализа.

Карты решений (рис. 1, д). Множество объектов (многокритериальных альтернатив) визуализируется в виде серии двумерных сечений этого множества, отличающихся значениями некоторого третьего критерия (отображаются различными цветами). Метод ориентирован на визуализацию границы Парето при решении задач многокритериальной оптимизации, позволяет оценить общую структуру множества альтернатив, но не обеспечивает визуализацию целостных образов объектов.

Лица Чернова (рис. 1, е). Параметрам объекта соответствуют различные части человеческого лица в количестве 18 или 36 (при введении асимметрии лица), а возможным значениям по каждому параметру — их вариации (например, рот маленький, средний, большой). Достоинства метода — большая наглядность и размерность, недостатки — трудность сравнения различных объектов, ограниченное число значений каждого параметра.

Проекции без потерь (метод роста) (рис. 1, ж). Метод основан на разделении координат четырехмерного объекта на две независимые пары координат. Вводится визуальный объект (росток точки), связанный с представлением двумерных сечений множества объектов. Метод не имеет ограничений по числу визуализируемых объектов, позволяет оценить общую структуру множества объектов, использует эффективные двумерные проекции, но имеет критические ограничения по размерности и не позволяет визуализировать целостные образы четырехмерных объектов.

Методы понижения размерности (рис. 1, з) основаны на анализе дисперсий значений параметров объектов:

- выбираются 2—3 параметра с максимальной дисперсией значений, значения остальных параметров заменяются на константы, равные средним значениям по каждому из параметров;
- суть популярного *метода главных компонент* состоит в переходе от исходной системы координат к новому ортогональному базису в рассматриваемом многомерном пространстве, оси которого ориентированы по направлениям максимальной дисперсии значений массива данных (вдоль эллипсоида рассеивания). Метод теоретически не имеет ограничений на число измерений, число объектов, позволяет сравнивать между собой различные объекты, анализировать целостный образ группы объектов — но путем редукции числа анализируемых параметров (измерений), что недопустимо при решении многих задач.

Сравнительный анализ существующих методов визуализации показывает их основные недостатки:

- ограничения на размерность — двумерные проекции, метод ростка, карты решений;
- редукция размерностей — метод главных компонент;
- нет целостного образа объекта — матричные диаграммы, карты решений, метод ростка;
- невозможность сравнивать значения по разным парам параметров (не используются проекции) — радары, звездные диаграммы, профили, лица Чернова;
- трудности сравнения различных объектов — лица Чернова.

Таким образом, существующие методы визуализации в целом не удовлетворяют одновременно важнейшим требованиям, таким как разумная независимость от размерности, эффективность визуализации (возможность визуализировать и сравнивать целостные образы объектов) и возможность сравнивать объекты по парам параметров.

2. ПОСТРОЕНИЕ СВЯЗАННЫХ ПРОЕКЦИЙ

В основе метода связанных проекций лежит развитие метода матричных графиков (см. рис. 1, з). На самом деле, возможности визуализации ограничиваются двумерной плоскостью, но не двумя координатными осями; таких пар осей (различных двумерных проекций) можно разметить на двумерной плоскости достаточно много, если соединить различные проекции особым образом и преобразовать однородную двумерную плоскость в неоднородную, т. е. каждый квадрант такой модели связанных проекций есть самостоятельная коор-

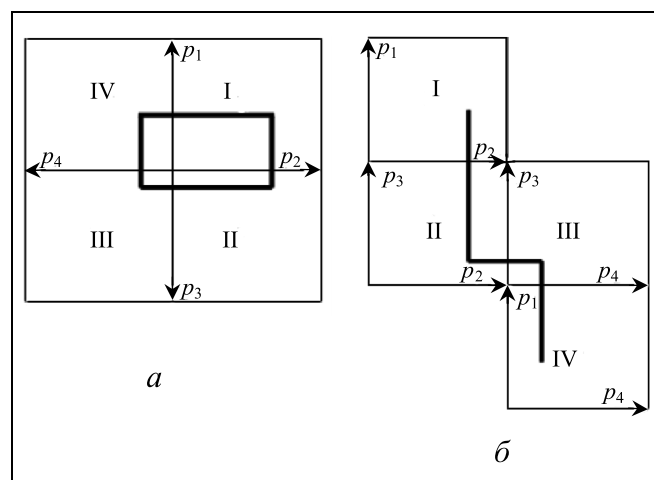


Рис. 2. Замкнутая (а) и открытая (б) модели связанных проекций

динатная плоскость со своими осями координат, соответствующая некоторой паре параметров.

На рис. 2, а МСП иллюстрируется для четырехмерного пространства параметров. Пусть $p = (p_1, p_2, p_3, p_4)$ — некоторая четырехмерная точка. Преобразуем координатную плоскость так, чтобы каждому из ее четырех квадрантов соответствовала отдельная двумерная проекция этой точки (например, для пар параметров (p_1, p_2) , (p_2, p_3) , (p_3, p_4) , (p_4, p_1)), а потом соединим точки двумерных проекций отрезками прямой (цифрами обозначен порядок обхода квадрантов). Задавая параметры в различной последовательности, можно получать различные визуальные представления точки p . Например, для последовательности $(p_1, p_3, p_3, p_2, p_2, p_2, p_4, p_4, p_1)$ будут получены проекции (p_1, p_3) , (p_3, p_2) , (p_2, p_4) , (p_4, p_1) .

Если присоединить квадрант 3 не слева, а справа от квадранта 2, то получим другую систему организации двумерных проекций и иное представление точки p — в виде ломаной (рис. 2, б). Назовем такое представление многомерных данных открытой моделью связанных проекций, а предыдущее — замкнутой моделью. Замкнутая модель может быть получена из открытой, если развернуть подобную «лестницу» и замкнуть ее в кольцо по часовой стрелке.

Модели связанных проекций можно строить различными способами, варьируя число квадрантов и способы их соединения. Перечисленные ниже правила построения позволяют обеспечить наиболее компактный и по возможности симметричный вид моделей:

- модель состоит из квадрантов, соединенных различным образом в зависимости от того, замкнутая она или открытая;

— все квадранты модели одинакового размера, что достигается нормированием значений всех параметров;

— квадранты соединяются друг с другом так, что каждая их пара имеет общую ось, соответствующую одному или двум параметрам;

— в замкнутой модели каждый четный квадрант присоединяется к предыдущему снизу или сверху, а нечетный — слева или справа, в зависимости от положения квадранта модели в том или ином квадранте координатной плоскости; в открытой модели каждый четный квадрант присоединяется к предыдущему снизу, а нечетный — справа;

— в каждом квадранте модели находится двумерная проекция многомерной точки для соответствующей пары параметров;

— визуальным представлением многомерной точки служит замкнутый многоугольник или ломаная, где стороны многоугольника (отрезки ломаной) соединяют точки двумерных проекций, находящиеся в различных квадрантах;

— в открытых моделях в каждом квадранте ориентация осей модели совпадает с ориентацией осей первого квадранта координатной плоскости OXY ; в замкнутых моделях ориентация осей квадрантов модели, находящихся в i -м, $i = \overline{1, 4}$, квадранте координатной плоскости OXY , совпадает с ориентацией осей этого квадранта координатной плоскости.

3. СВОЙСТВА МОДЕЛЕЙ СВЯЗАННЫХ ПРОЕКЦИЙ

3.1. Основные определения

Приведем основные определения для МСП. Пусть $x = (x^1, x^2, \dots, x^n)$ — некоторый многомерный объект размерностью n .

Определение 1. Квадрантом модели связанных проекций, образованным параметрами с номерами i и j , где $i, j \in I$, $I = \{1, 2, \dots, n\}$, назовем ограниченную часть плоскости OXY , где сформирована локальная система координат с осями для параметров с номерами i и j .

Определение 2. Двумерной проекцией объекта x для квадранта, образованного параметрами с номерами i и j , назовем точку с координатами (x^i, x^j) в данном квадранте.

Определение 3. Два квадранта называются связанными, если они имеют общую сторону (координатную ось).

Определение 4. Общая координатная ось двух связанных квадрантов называется запрещенной, если ее не могут пересекать стороны многоугольников (отрезки ломаных).

Определение 5. Общая координатная ось двух связанных квадрантов называется неоднозначной,

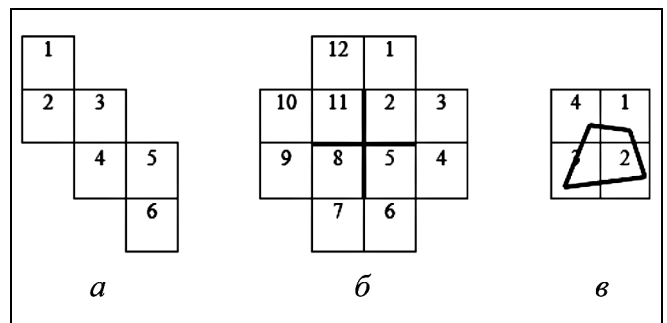


Рис. 3. Различные модели связанных проекций: *a* — открытая модель; *b* — симметричная модель; *c* — замкнутая неправильная модель; она весьма компактна и полезна для практического применения — в ее четырех квадрантах в виде четырехугольника отображается объект восьмимерного пространства (все оси модели неоднозначные)

если различным ее сторонам соответствуют различные параметры объекта; иначе ось называется однозначной.

Определение 6. Модель называется замкнутой, если ее первый и последний квадранты (в порядке построения) являются связанными, и модель имеет симметрию второго порядка относительно оси OY координатной плоскости; иначе модель называется открытой.

Определение 7. Модель называется правильной, если она не содержит неоднозначных осей.

Определение 8. Замкнутая модель называется симметричной, если комбинация ее квадрантов имеет симметрию 4-го порядка относительно центра модели.

Определение 9. Модель связанных проекций определяется как пятерка $V = \langle X, n, t, s, p \rangle$, где X — исходное множество объектов; n — размерность пространства параметров объектов (число измерений); t — тип модели (замкнутая, открытая); s — число квадрантов модели; $p = (p_1, p_2, \dots, p_m)$, $m = 2s$ — последовательность номеров параметров в порядке их использования в модели. Очевидно, что каждый j -й квадрант модели, $j \in \{1, 2, \dots, s\}$, соответствует паре параметров с номерами p_{2j-1} и p_{2j} , определяющих оси данного квадранта.

На рис. 3 изображены некоторые модели связанных проекций; цифрами отражен порядок обхода квадрантов (по часовой стрелке, сверху вниз); запрещенные оси выделены.

3.2. Количественные свойства моделей связанных проекций

Приведем некоторые свойства моделей связанных проекций, которые достаточно очевидны из их визуального анализа при малых значениях s . Всюду далее через $R(x)$ будем обозначать целую часть числа x .



Свойство 1. При заданном n число квадрантов s в моделях связанных проекций может изменяться от $R(n/2)$ до $n(n-1)/2$. ♦

Когда каждый параметр образует пару в двумерной проекции только с одним другим параметром, число квадрантов минимально, когда с каждым из $n-1$ параметров — максимально.

Свойство 2. В замкнутых моделях число квадрантов четно. ♦

В замкнутых моделях число квадрантов всегда четно из-за наличия осевой симметрии.

Свойство 3. Замкнутая модель симметрична тогда и только тогда, когда $s = 4 + 8l$, где l — целое неотрицательное число. ♦

Несимметричные модели образуются при четном числе квадрантов модели в двух или всех четырех квадрантах координатной плоскости OXY .

Свойство 4. Замкнутая модель правильна, если она симметрична и $s \geq n$, открытая — если $s \geq n$.

Свойство 5. Для заданного числа квадрантов s возможна визуализация многомерных данных в диапазоне размерностей:

- от n_1 — наибольшего целого числа, удовлетворяющего неравенству $s \geq n(n-1)/2$ (каждый параметр образует пары в проекциях со всеми другими параметрами);

- до $n_2 = 2s$, когда каждый параметр образует пару в проекции только с одним другим параметром и модель не является правильной.

Свойство 6. Число появлений q каждого параметра в последовательности параметров p может меняться от одного до $n-1$ раз. ♦

При $q = 1$ все оси в неправильной модели неоднозначные, при $q = n-1$ каждый параметр образует пару с каждым из других параметров.

Свойство 7. Число сторон многоугольников в замкнутой модели равно числу квадрантов s , число отрезков ломаной в открытой модели равно $s-1$. ♦

Для обеих моделей каждая i -я сторона (отрезок) соединяет двумерные проекции в квадрантах с номерами i и $i+1$ (для замкнутой модели n -я сторона соединяет проекции в квадрантах n и 1).

Свойство 8. В правильной модели стороны многоугольников (отрезки ломаных) соединяются друг с другом и пересекают оси квадрантов под прямым углом.

Свойство 9. В неправильной модели стороны многоугольников (отрезки ломаных) в общем случае соединяются друг с другом и пересекают оси квадрантов под произвольным (необязательно прямым) углом. ♦

Условие «в общем случае» означает, что однозначные оси пересекаются под прямым углом, а

при определенных сочетаниях значений параметров в связанных квадрантах сторона многоугольника (отрезок ломаной) может пересекать неоднозначную ось под прямым углом.

Свойство 10. В неправильных моделях число неоднозначных осей равно $n-s$. ♦

Это означает, что при $s < n$ стороны многоугольника числом $n-s$ в замкнутой модели или $n-s$ отрезков ломаной в открытой модели в общем случае не будут перпендикулярны неоднозначным осям.

3.3. Алгебраические свойства моделей связанных проекций

При визуальном анализе многомерных объектов важно иметь возможность сравнивать их между собой.

Для заданной модели связанных проекций $V = \langle X, n, t, s, p \rangle$ поставим в соответствие каждому многомерному объекту $x \in X$ многоугольник $m_x = (m_x^1, m_x^2, \dots, m_x^s)$ из некоторого множества многоугольников M либо ломаную $l_x = (l_x^1, l_x^2, \dots, l_x^{s-1})$ из некоторого множества ломаных L , где m_x^j и l_x^j , соответственно, сторона многоугольника и отрезок ломаной. Каждая j -я сторона (j -й отрезок) будет соединять две двумерные проекции точки x для пар параметров (p_{2j-1}, p_{2j}) и (p_{2j+1}, p_{2j+2}) .

Утверждение. Для заданной модели визуализации $V = \langle X, n, t, s, p \rangle$ каждому многомерному объекту $x \in X$ соответствует один и только один геометрический объект — многоугольник $m_x \in M$ либо ломаная $l_x \in L$. ♦

На самом деле, для каждого объекта $x \in X$ существует единственное графическое представление в множестве M либо в множестве L , поскольку тип модели, число квадрантов и сопоставленные их осям параметры фиксированы для заданной модели.

Далее только для правильных моделей определим на множестве M отношения доминирования (включения) « $\geq$ », строгого доминирования « $>$ » и несравнимости « $<>$ ».

Будем говорить, что многоугольник $m_x \in M$ доминирует многоугольник $m_y \in M$, $m_x \geq m_y$, если существует хотя бы один номер стороны многоугольника $1 \leq j \leq s$ такой, что данная j -я сторона m_y совпадает с частью j -й стороны m_x , т. е. контур многоугольника m_x нестрого включает контур многоугольника m_y .

При строгом доминировании многоугольником $m_x \in M$ многоугольника $m_y \in M$, $m_x > m_y$, контур m_x полностью включает в себя контур m_y . Многоугольники $m_x, m_y \in M$ несравнимы, $m_x <> m_y$, если стороны m_x и m_y пересекаются под прямым углом друг с другом хотя бы в одном квадранте.

Перечисленные отношения удовлетворяют следующим свойствам отношений на M : отношение доминирования — рефлексивность, антисимметричность, транзитивность; отношение строгого доминирования — асимметричность, транзитивность; отношение несравнимости — симметричность.

Аналогичные отношения и их свойства имеют место для ломаных из множества L .

Только для правильных моделей определим далее алгебраические операции над многоугольниками из множества M .

Объединением многоугольников $m_x, m_y \in M$ является многоугольник $m_z = m_x \cup m_y$ (возможно, $m_z \notin M$) такой, что он представляет собой наименьший многоугольник, содержащий оба исходных многоугольника, т. е. доминирующий каждый из них: $m_z \geq m_x, m_z \geq m_y$. Многоугольник m_z является визуальным представлением многомерного объекта z (возможно, $z \notin X$) такого, что $z^i = \max(x^i, y^i)$, $i = \overline{1, n}$. Пересечением многоугольников $m_x, m_y \in M$ представляет собой многоугольник $m_z = m_x \cap m_y$ (возможно, $m_z \notin M$) — наибольший многоугольник, содержащийся в обоих исходных многоугольниках.

Операции объединения и пересечения коммутативны, ассоциативны, дистрибутивны, причем относительно каждой из них объекты из множества M обладают единичным элементом.

Единичным элементом относительно операции объединения является многоугольник $m^- = \bigcap_{m \in M} m$, представляющий собой пересечение всех многоугольников из множества M и являющийся визуальным представлением объекта $x_{\min}$ (возможно, $x_{\min} \notin X$) такого, что $x_{\min}^i = \min_{x \in X} x^i$, $i = \overline{1, n}$. Единичным элементом относительно операции пересечения является многоугольник $m^+ = \bigcup_{m \in M} m$ — объединение всех многоугольников из множества M .

Поскольку относительно операций объединения и пересечения элементы множества M не обладают обратными элементами, то алгебры $(M, \cup)$, $(M, \cap)$ являются абелевыми полугруппами. Так же можно определить операции объединения и пересечения для ломаных из множества L , обладающие аналогичными свойствами.

4. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СВЯЗАННЫХ ПРОЕКЦИЙ

4.1. Общая информация

Различные модели связанных проекций — замкнутые и открытые, правильные и неправильные, имеют свои преимущества и недостатки. Поэтому конкретный тип модели выбирается в зависимости от специфики решаемой задачи, ее размерности, важности каждого анализируемого параметра и др.

Так, для замкнутых моделей характерны наглядность и компактность, а для открытых — теоретически неограниченная размерность и простота построения. Правильные модели эффективно отображают такие свойства многокритериальных альтернатив, как доминирование, принадлежность множеству Парето и др., неправильные модели более компактны и могут строиться для большего числа параметров при заданном числе квадрантов.

К недостаткам замкнутых моделей относятся сложность построения и определенные ограничения по размерности, открытых моделей — недостаточная компактность и наглядность; неправильные модели не могут быть применены для решении задач многокритериальной оптимизации. Наконец, как многоугольники, так и ломаные достаточно громоздки, что ограничивает число визуализируемых объектов.

Преимущества МСП как метода визуализации многомерных объектов в том, что можно:

- визуализировать многомерные объекты достаточно большой размерности;
- анализировать многомерные объекты как целостные геометрические объекты (многоугольники или ломаные), имеющие регулярные свойства (отношения доминирования, метрические свойства и др.);
- анализировать многомерные объекты для разных пар параметров, пользуясь двумерными проекциями.

Минимальные ограничения для применения МСП:

- для всех параметров многомерных объектов (всех шкал измерений) выполняются аксиомы упорядоченности, т. е. это могут быть любые шкалы, кроме номинальных;
- значения каждого параметра положительны и ориентированы на максимизацию.

Поэтому МСП может применяться для визуализации самых различных многомерных объектов, например, в математике, физике, технических науках, социологии, психологии, при решении задач стратегического планирования, многокритериальной оптимизации и др.

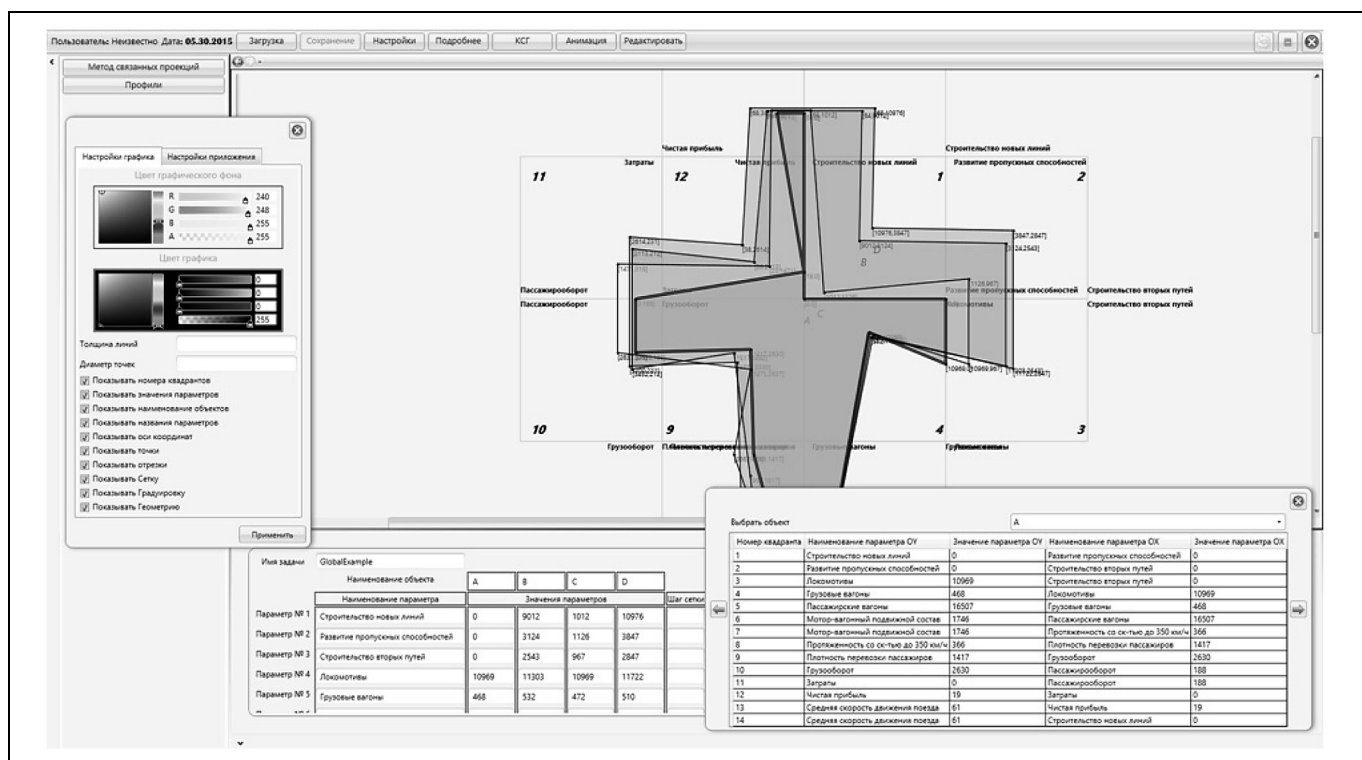


Рис. 4. Скриншот системы визуализации

Для эффективной программной реализации МСП необходим ряд возможностей диалогового интерфейса:

- задавать и изменять модель визуализации, включая число квадрантов, состав и последовательность пар параметров в модели;
- вводить параметры объектов в табличной форме;
- изменять масштаб и цветовые решения визуализации;
- листать объекты при визуализации, показывая их целиком или только их вершины;
- задавать параметры управления процессом визуализации, например, показывать идеальную точку и множество Парето для многокритериальных альтернатив;
- отражать динамику развития многомерных объектов (используя траекторию, анимацию).

На рис. 4 приведен скриншот системы визуализации для МСП (правильная замкнутая модель, 4 объекта, 12 параметров).

4.2. Применение метода связанных проекций в стратегическом планировании

В стратегическом планировании широко применяются матричные модели, которые являются одним из его наиболее популярных и немногих

формализованных инструментов. Положение экономического объекта (например, компании) для заданной пары параметров (например, положение на рынке, привлекательность рынка и др.) изображается в виде точки или окружности на координатной плоскости. Находятся пороговые значения варьируемых параметров и каждой клетке такой матрицы сопоставляются качественно различающиеся ситуации и стратегии. Всего известно более 30 матричных моделей, таких как 2×2 матрица БКГ, 3×3 матрица McKinsey, 4×5 матрица ADL/LC и т. д. [14].

Число параметров может быть достаточно велико, и для каждой их пары может быть построена матричная модель, отражающая свою грань исследования компании. К таким параметрам относятся конкурентная позиция, привлекательность рынка, жизненный цикл отрасли, новизна товара, а также темпы роста продаж, рентабельность, стоимостные показатели, уровень возможностей и угроз и др.

Матричные модели фактически реализуют метод двумерных проекций визуализации точек многомерных пространств (так называемые пузырьковые диаграммы), поэтому в силу ограничений этого метода на практике обычно применяется только небольшое число матричных моделей (для пар наиболее информативных параметров). Дру-

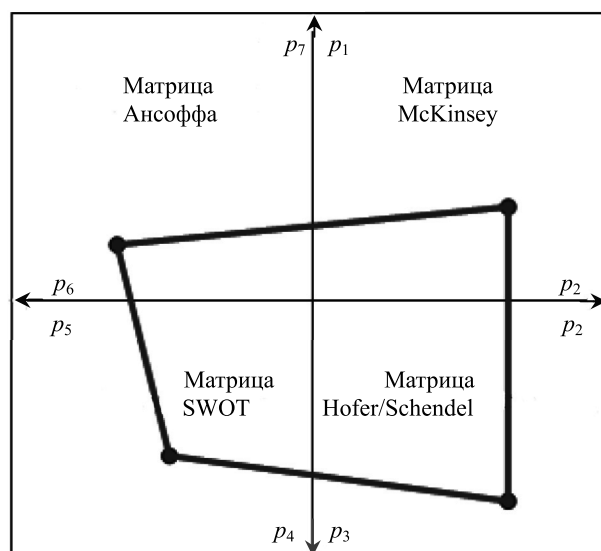


Рис. 5. Пример многомерной матричной модели

гие недостатки таких моделей — отсутствие целостного образа анализируемой компании и трудности сравнения между собой различных компаний, поскольку компании, идентичные по двум параметрам, могут полностью различаться по остальным.

Метод связанных проекций позволяет эффективно отображать самые различные многомерные экономические объекты — компании, регионы, населенные пункты, отрасли в виде многомерных матричных моделей [11, 12]. Применение замкнутых неправильных моделей связанных проекций позволяет, в частности, визуализировать восьмимерные экономические объекты, отображая одновременно четыре матричные модели. При этом каждая из четырех двумерных проекций может также характеризоваться своим размером и цветом, что позволяет визуализировать в виде целостного образа объекты размерностью 16.

На рис. 5 приведен пример достаточно успешной компании, выводившей при среднем уровне рыночных угроз новый продукт на существующий рынок, находящийся в состоянии спада. Параметры многомерной матрицы: p_1 — привлекательность рынка, p_2 — положение на рынке (конкурентная позиция), p_3 — стадия развития рынка, p_4 — сила-слабость отрасли, p_5 — возможности-угрозы для отрасли, p_6 — новизна продукта, p_7 — новизна рынка. Эта многомерная матричная модель объединяет сразу несколько популярных моделей: McKinsey, Hofer/Schendel, SWOT, модель Ансоффа [14] и дает достаточно полную характеристику компании.

Многомерные матрицы предоставляют следующие преимущества:

- вместо того чтобы анализировать экономические объекты с помощью набора различных матричных моделей, появляется возможность анализировать целостные образы этих объектов в виде многоугольников либо ломаных на единой многомерной матрице;

- установление соответствия между различными типами визуальных образов многоугольников или ломаных (размер, форма, положение относительно координатных осей) и характеристиками экономических объектов позволяет быстро делать необходимые выводы по одному внешнему виду визуального образа;

- появляется возможность легко вводить и анализировать собственные многомерные матричные модели, комбинируя их компоненты различным образом.

Кроме того, метод связанных проекций может быть применен в стратегическом планировании (корпоративном или региональном) для:

- визуализации конкурентов компании в виде многомерной карты стратегических групп конкурентов (по аналогии с многомерными матричными моделями) [14];

- визуализации портфеля компании, отражающего состав и взаимное положение входящих в компанию относительно самостоятельных бизнес-единиц;

- визуализации стратегий развития компании, региона, отрасли [11, 12], которые также являются точками многомерного пространства параметров;

- отображения и анализа многомерных стратегических альтернатив.

4.3. Применение метода связанных проекций при принятии решений

Метод связанных проекций может быть применен для решения задач многокритериальной оптимизации [12, 13], поскольку любая многокритериальная альтернатива является многомерным объектом — точкой многомерного критериального пространства.

Установление для каждой заданной модели связанных проекций взаимно однозначного соответствия между многокритериальными альтернативами из X и геометрическими объектами из множеств M и L позволяет интерпретировать в терминах этих объектов ряд понятий многокритериальной оптимизации (см. таблицу).

Такая интерпретация возможна лишь для правильных моделей связанных проекций; для неправильных моделей принятие решений на основании внешнего вида геометрических объектов не всегда

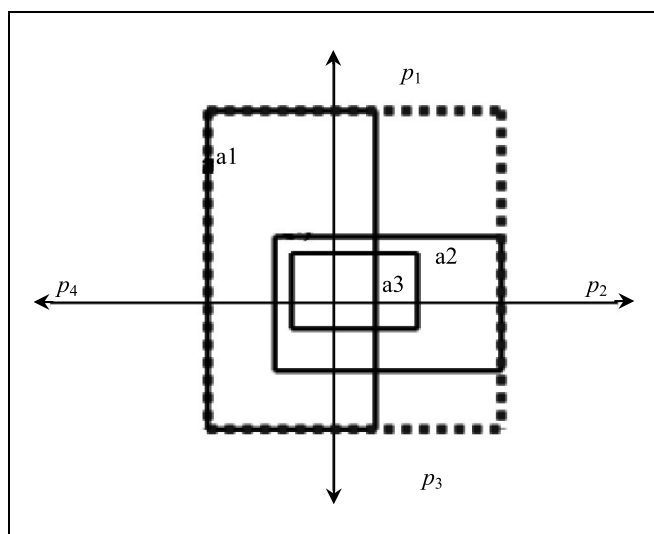


Рис. 6. Пример визуализации многокритериальных альтернатив

возможно: в неправильных моделях могут пересекаться многоугольники (ломаные), соответствующие не только несравнимым альтернативам (в том числе паретовским), но и связанные отношением доминирования или строгого доминирования.

На рис. 6 приведен пример визуализации многокритериальных альтернатив в четырехмерном пространстве для критериев p_1 , p_2 , p_3 и p_4 . Альтер-

натива a_2 доминирует альтернативу a_3 , альтернативы a_1 и a_2 принадлежат множеству Парето, идеальная точка выделена пунктиром.

Установленное соответствие между визуальными характеристиками геометрических объектов и характеристиками альтернатив дает возможность принимать решения о выборе альтернатив на основании внешнего вида этих объектов. Так, для замкнутой модели:

- чем больше «размер» (площадь) многоугольника, тем выше качество альтернативы, тем ближе она к идеальной точке;
- чем «симметричнее» многоугольник (по форме и положению относительно начала координат), тем более «сбалансирована» альтернатива по различным критериям;
- взаимное положение многоугольников отражает такие свойства альтернатив, как доминирование, принадлежность множеству Парето, близость к идеальной точке и др.

Поэтому эксперт может принимать решения о выборе альтернатив, основываясь на двух основных неформализованных критериях оценки: «размере» и «симметричности» альтернатив, что позволяет свести многокритериальную задачу к двухкритериальной.

Пусть $x \in X$ — произвольная альтернатива, E^+ — идеальная точка, E^- — «антиидеальная» точка для

Графическая интерпретация понятий многокритериальной оптимизации (МКО)

Понятия МКО	Интерпретация для замкнутой модели
<i>Доминирование.</i> Альтернатива x доминирует альтернативу y , $x \geq y$, $x, y \in X$, если $x^i \geq y^i$ для любого $i = \overline{1, n}$	Многоугольник m_x включает многоугольник m_y , причем стороны многоугольников могут частично совпадать, т. е. $m_x \geq m_y$, $m_x, m_y \in M$
<i>Строгое доминирование.</i> Альтернатива x строго доминирует альтернативу y , $x > y$, $x, y \in X$, если $x^i > y^i$ для любого $i = \overline{1, n}$	Многоугольник m_x полностью включает в себя многоугольник m_y , т. е. $m_x > m_y$, $m_x, m_y \in M$
<i>Несравнимость.</i> Альтернативы x и y несравнимы, $x \not<> y$, $x, y \in X$, если существуют $i, j = \overline{1, n}$ такие, что $x^i > y^i$, но $x^j < y^j$	Стороны многоугольников m_x и m_y пересекаются под прямым углом в некоторых квадрантах, т. е. $m_x \not<> m_y$, $m_x, m_y \in M$
<i>Оптимальность по Парето.</i> Альтернатива $x^* \in X$ оптимальна по Парето, если не существует альтернативы $x \in X$ такой, что $x \geq x^*$; для любых оптимальных по Парето альтернатив $x^*, y^* \in X$ справедливо $x^* \not<> y^*$	Многоугольник $m^* \in M$, для которого не существует многоугольника $m \in M$ такого, что $m \geq m^*$
<i>5. Идеальная точка.</i> Альтернатива x^* является идеальной точкой для X , если $x^* \geq x$ для любого $x \in X$	Многоугольник m^* , включающий в себя все остальные многоугольники из множества M , является объединением всех многоугольников из множества M , т. е. $m^* = \bigcup_{m \in M} m$, $m^* \geq m$ для любого $m \in M$

x и $E_i(x)$ — значение i -го критерия альтернативы x , $i = \overline{1, n}$. Выполним нормирование значений:

$$E_i^*(x) = (E_i(x) - E_i^-)/(E_i^+ - E_i^-).$$

Сопоставим альтернативе x альтернативу y в двухкритериальном пространстве, где

$$E_1(y) = \sum_{i=1}^n E_i^*(x)/m, E_2(y) = \\ = \left(\sum_{i=1}^n [E_i^*(x) - E_1(y)]^2 \right) / n.$$

Здесь «размер» альтернативы y характеризуется значением среднего для значений нормированных критериев (математическим ожиданием) $E_1(y)$, а «симметричность» альтернативы — степенью разброса значений (дисперсией) $E_2(y)$. Такие альтернативы легко визуализируются с помощью стандартных двумерных проекций (пузырьковых диаграмм).

Применение МСП для визуализации многокритериальных альтернатив предоставляет ряд следующих преимуществ:

— позволяет делать выводы о строении и специфике исходного множества альтернатив на интуитивном уровне;

— позволяет детально анализировать каждую многокритериальную альтернативу как целостный визуальный объект;

— обеспечивает окончательный выбор наилучшей альтернативы для реализации по неформализованным критериям оценки на основе анализа как внешнего вида соответствующих геометрических объектов, так и их взаимного положения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новизна метода связанных проекций состоит в том, что был предложен новый способ визуализации многомерных данных — введение неоднородности плоскости визуализации, что позволяет анализировать набор двумерных проекций для различных пар параметров многомерного объекта как некоторый целостный образ — многоугольник или ломаную. Значимость метода состоит в том, что он обеспечивает выполнение сразу несколько важных требований к визуализации многомерных объектов, таких как достаточно большая размерность, возможность визуализировать и сравнивать целостные образы объектов, возможность позиционировать эти объекты для различных пар параметров, что важно, в частности, при решении задач стратегического планирования.

В качестве дальнейших перспектив развития метода связанных проекций можно отметить более глубокое исследование количественных и алгебраических свойств геометрических объектов, изучение особенностей визуализации других видов многомерных объектов (помимо рассмотренных стратегических позиций и многокритериальных альтернатив), развитие метода для визуализации недетерминированных многомерных данных — стохастических, нечетких и интервальных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mazza, R. Introduction to Information Visualization. — London: Springer-Verlag Ltd, 2009. — 149 p.
2. Авербух В.Л. Семиотический подход к формированию теории компьютерной визуализации // Научная визуализация. — 2013. — Т. 5, № 1. — С. 1–25. [Averbukh, V.L. Semioticheskii podkhod k formirovaniyu teorii komp'yuternoi vizualizatsii // Nauchnaya vizualizatsiya. — 2013. — Т. 5, No. 1. — С. 1–25. (In Russian)]
3. Manakov, D.V., Averbukh, V.L., Vasev, P.A. Visual Text as Truth Subset of the Universal Space // Scientific Visualization. — 2016. — Vol. 8, No. 4. — P. 38–49.
4. Vickers, P., Faith, J., Rossiter, N. Understanding Visualization: a Formal Approach Using Category Theory and Semiotics // IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics. — 2013. — Vol. 19, No. 6. — P. 1048–1061.
5. Пескова О.В. О визуализации информации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». — 2012. — № 9. — С. 158–173. [Peskova, O.V. O vizualizatsii informatsii // Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. «Priporostroenie». — 2012. — No. 9. — S. 158–173. (In Russian)]
6. Лотов А.В., Поспелова И.И. Многокритериальные задачи принятия решений. — М.: МАКС Пресс, 2008. — 197 с. [Lotov, A.V., Pospelova, I.I. Mnogokriterial'nye zadachi prinyatiya reshenii. — Moscow: MAKS Press, 2008. — 197 s. (In Russian)]
7. Nelyubin, A.P., Galkin, T.P., Galaev, A.A., etc. Usage of Visualization in the Solution of Multicriteria Choice Problems // Scientific Visualization. — 2017. — Vol. 9, No. 5. — P. 59–70.
8. Клышинский Э.С., Рысаков С.В., Шухов А.И. Обзор методов визуализации многомерных данных // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. — 2014. — Вып. 17. — С. 519–530. [Klyshinskii, E.S., Rysakov, S.V., Shikhov, A.I. Obzor metodov vizualizatsii mnogomernykh dannykh // Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh. — 2014. — Vyp. 17. — S. 519–530. (In Russian)]
9. Желязны Д. Говори на языке диаграмм: Пособие по визуальным коммуникациям / Пер. с англ. — М.: Манн, Иванов и Фербер, 2012. — 304 с. [Zhelyazny, D. Govori na yazyke diagramm: Posobie po vizual'nym kommunikatsiyam / Per. s angl. — Moscow: Mann, Ivanov i Ferber, 2012. — 304 s. (In Russian)]
10. Соломатин А.Н. Генерация, визуализация и выбор многокритериальных альтернатив. — М.: ВЦ РАН, 2005. — 44 с. [Solomatin, A.N. Generatsiya, vizualizatsiya i vybor mnogokriterial'nykh al'ternativ. — Moscow: VTs RAN, 2005. — 44 s. (In Russian)]
11. Соломатин А.Н. Многомерные модели стратегического управления развитием крупномасштабных систем // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2007): Труды Первой междунар. конф. (1–3 окт. 2007 г., Москва). — М.: ИПУ РАН, 2007. — С. 37–46. [Solomatin, A.N. Mnogomernye modeli strategicheskogo upravleniya razvitiem krupnomasshtabnykh sistem // Upravlenie razvitiem krupno-



- masshtabnykh sistem (MLSD'2007): Trudy Pervoi mezhdunar. konf. (1—3 okt. 2007 g., Moskva). — M.: IPU RAN, 2007. — S. 37—46. (In Russian)]
12. Solomatin, A.N. Visualization of multidimensional data: method of connected projections // Eleventh International Conference «Management of Large-Scale System Development» (MLSD) / Moscow (October 2018). — IEEE Conf. Publications, IEEE Xplore Digital Library. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8551769>.
 13. Соломатин А.Н. Визуализация многокритериальных альтернатив при принятии решений // Тр. II междунар. конф. «Системный анализ и информационные технологии» САИТ—2007 (10—14 сент. 2007, г., Обнинск). — Т. 1. — М.: ЛКИ, 2007. — С. 228—231. [Solomatin, A.N. Vizualizatsiya mnogokriterial'nykh al'ternativ pri prinyatii reshenii // Tr. II mezhdunar. konf. «Sistemnyi analiz i informatsionnye tekhnologii» SAIT—2007 (10—14 Sent. 2007, g., Obninsk). — Т. 1. — М.: ЛКИ, 2007. — С. 228—231. (In Russian)]
 14. Зуб А.Т. Системный стратегический менеджмент: теория и практика. — М.: Генезис, 2001. — 751 с. [Zub, A.T. Sistemnyi strategicheskii menedzhment: teoriya i praktika. — М.: Genezis, 2001. — 751 s. (In Russian)]
- Статья представлена к публикации членом редколлегии А.Д. Цвиркуном.*
- Поступила в редакцию 28.06.2019, после доработки 21.08.2019. Принята к публикации 24.09.2019.*
- Соломатин Александр Николаевич** — канд. физ.-мат. наук, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва.
✉ a.n.solomatin@bk.ru.

METHOD OF CONNECTED PROJECTIONS AND ITS USE FOR VISUALIZATION OF MULTIDIMENSIONAL DATA

A.N. Solomatin

Federal Research Center «Computer Science and Control» of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉ a.n.solomatin@bk.ru

Abstract. The method of the connected projections is suggested providing the visualization on the plane of the multidimensional data in the form of geometric objects — polygons and broken lines. One more new tool is added to standard means of multidimensional data visualization — the introduction of the visualization plane heterogeneity. The model of the connected projections consists of the quadrants of the same size that are connected in a special way. The located in each quadrant two-dimensional projections of a multidimensional point are connected, forming polygons or broken lines. The analysis of the existing methods of multidimensional data visualization is given and the set of rules for the construction of models of the connected projections is provided. Some quantitative and algebraic properties of the introduced geometric objects are investigated. The main advantages of the method and the features of its computer implementation are listed. The peculiarities are given of using the method for the visualization of multidimensional matrix models in solving the problems of strategic planning and for the visualization of multicriteria alternatives in solving the problems of multicriteria optimization.

Keywords: multidimensional data visualization, method of connected projections, polygons and broken lines, strategic region management, matrix models, multicriteria optimization.



Новая книга

Сидельников Ю.В. Экспертное прогнозирование (Expert prognosycation). — М.: Доброе слово, 2018. — 248 с. (Параллельный текст на русском и английском языках). — ISBN: 978-5-89796-632-X

Рассмотрен ряд базовых проблемных вопросов математической идентификации организационных структур, институциональных обособлений мезо- и микроуровня, характерных и типизированных для современного авиационно-промышленного комплекса Российской Федерации. Цель монографии состоит в содействии взаимопониманию англоязычных и русскоговорящих исследователей прогнозтики, повышению уровня качества прогнозов. Выявлены и систематизированы недостатки и трудности субъектов, участвующих в экспертном прогнозировании, их заблуждения. Разработан системный анализ технологии экспертного прогнозирования и предложен метод двухуровневого сценария. Определены подходы к определению меры уверенности эксперта в своей оценке. Приведены аналитические обзоры экспертных оценок первого и второго рода и обзор подходов к систематизации методов прогнозирования. Введены определения некоторых видов экспертных оценок. Рассмотрены состояние и тенденции развития экспертизы, а также динамика занятости в РФ и факторов, ее определяющих. Апробирован метод двухуровневого сценария при разработке прогноза безработицы в РФ.

Результаты работы могут быть полезны специалистам, занимающимся проблемами теории и практики экспертной прогнозтики, а также студентам соответствующих специальностей.

Рецензенты: д-р экон. наук А.И. Агеев, д-р техн. наук В.Н. Бурков; научный консультант-редактор: Т.В. Подиновская; веб-разработчик Бизнес-школа Уорвик, Великобритания.

ДВУХСТАДИЙНЫЕ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОТОЧНОЙ ЛИНИИ

Ю.А. Зак

Аннотация. Сформулирована задача построения расписаний двухстадийной обработки множества изделий на двух расположенных в последовательную цепочку системах машин в одной и той же и одинаковой для всех изделий последовательности. Число машин на каждой стадии обработки может быть различным. Ни одна из выполняемых операций не допускает прерываний в процессе ее выполнения. Учтены также потери времени на постобработку после завершения первой стадии изготовления. В качестве критерия оптимальности рассмотрено выполнение всего комплекса работ в кратчайшие сроки. Получены оценки нижней границы оптимальной последовательности обработки изделий, обеспечивающие выполнение всех работ на двух стадиях обработки в кратчайшие сроки. Предложены алгоритмы точного и приближенного решения задачи методами ветвей и границ и динамического программирования, а также эвристический алгоритм полиномиальной сложности получения приближенных решений. Алгоритмы решения проиллюстрированы на числовом примере. Полученные результаты могут найти широкое применение в системах календарного планирования работы производственных участков и цехов машиностроительного и приборостроительного производства, а также в процессах деревообработки, электронной и легкой промышленности.

Ключевые слова: двухстадийные расписания, flow-shop-problem, оптимальные последовательности, метод ветвей и границ, динамическое программирование, эвристический алгоритм.

ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим технологический процесс, предусматривающий выполнение заданий и изготовление изделий на двух последовательных стадиях обработки. На этих стадиях все изделия обрабатываются на каждой стоящей в последовательной цепочке системе машин и, как на первой, так и на второй стадии обработки, в одной и той же последовательности. После первой стадии производится постобработка каждого изделия, связанная с испытанием и контролем качества, необходимым временем пролёживания (например, с охлаждением или нагреванием, оформлением необходимой документации, транспортными потерями времени и др.), что также требует затрат времени, различного для каждого из изделий. На первой стадии последовательная цепочка включает в себя m_1 машин, на второй — m_2 . Более сложной может быть ситуация, когда допускаются отличные друг от дру-

га последовательности обработки изделий на каждой стадии изготовления. Без ограничения общности затраты времени на постобработку при решении задачи могут рассматриваться либо как время обработки на последней машине первой стадии изготовления, либо как время обработки на включенной в цепочку первой машине второй стадии изготовления.

Необходимо определить оптимальную последовательность обработки изделий, а также времена начала и завершения обработки группы, состоящей из n , $i = 1, \dots, n$, изделий, одинаковую на всех машинах двух стадий обработки, обеспечивающие выполнение всего комплекса работ в кратчайшие сроки. Задача построения расписания на одной стадии обработки широко известна в литературе (см., например, работы [1–6]) и относится к классу задач планирования для поточной линии (англ. *Flow-Shop-Problem*). Все перемещения обрабатываемых изделий, связанные с окончанием их обработки на одной машине и началом обработки на другой, следуют только в одном направлении.



Обобщенная задача Джонсона (Flow-Shop-Problem) формулируется таким образом:

- на некоторой последовательности, состоящей из $m, k = 1, \dots, m$, машин, необходимо выполнить $n, i = 1, \dots, n$, заданий (обработку n изделий);
- каждое из заданий состоит из некоторой упорядоченной последовательности выполнения m работ (операций) на различных машинах; никакая машина не может выполнять более одной операции одновременно;
- длительности выполнения t_{ik} каждой из этих операций постоянны, известны и не зависят от последовательности выполнения остальных операций на этой или других машинах;
- ни одна из этих операций не допускает прерываний в процессе ее выполнения;
- каждое из заданий выполняется в строго заданной и одинаковой для всех заданий последовательности $K = \{1, \dots, m\}$;
- каждая из операций назначается только на одну определенную машину;
- последовательность прохождения всех машин задана и одинакова для всех заданий.

Необходимо определить последовательность выполнения заданий, обеспечивающую минимальное время выполнения всех работ.

Одностадийные расписания Flow-Shop-Problem относятся к классу NP -сложных проблем, однако некоторые из них могут быть решены за полиномиальное время. Рассматриваемые в литературе многочисленные эвристические методы и правила предпочтения [3, 4, 6–11], генетические алгоритмы (см., например, работы [6, 7]) позволяют зачастую, как показывают вычислительные эксперименты, получить хорошие приближения к оптимальному решению задачи. Правила последовательного улучшения последовательности выполнения заданий путем обмена местами двух индексов [3, 4, 6] не могут рассматриваться как методы спуска в зону глобального минимума. Создание гибридных методов, которые на основе хороших эвристик позволяют осуществить попадание в зону глобального минимума, а затем методами перестановки местами двух индексов заданий осуществить спуск в точку локального минимума этой области. Ни одна из предложенных в литературе эвристик не гарантирует попадание в область глобального минимума. Сравнительно небольшой объем вычислений эвристических алгоритмов и методов локальных вариаций обеспечивает их широкое применение в практических приложениях и в условиях большой размерности [2–4]. Эффективные точные и приближенные методы решения Flow-Shop-Problem в условиях ограничений на сроки и частичные порядки выполнения заданий

рассмотрены в работах автора [3, 4]. Несмотря на большое число приложений в календарном планировании производства, задачам двухстадийного построения расписаний в этих условиях не уделялось достаточного внимания в литературе. Можно отметить лишь несколько публикаций в периодической литературе по данной тематике. В работе [12] предлагается алгоритм построения оптимального по быстродействию расписания обслуживания множества требований в двухстадийной системе с нефиксированными маршрутами и ресурсными ограничениями. В работе [13] рассматривались свойства и приближенные методы решения задач построения расписаний многостадийной обработки изделий на одной машине в различных постановках и с различными критериями оптимальности. Многоступенчатые расписания на одной машине в условиях переналадки рассматривались в работе [14]. В зарубежных публикациях, в основном, рассматривались прикладные задачи по данной тематике: рассмотрен эвристический алгоритм для расписания действий экипажа при управлении самолетом [15]; предложен двухступенчатый подход к планированию квантовых цепей [16]; приведены приложения таких постановок для двухступенчатого режима холодной прокатки [17]. Определение размеров партий и составление графиков производства нескольких продуктов в многоступенчатых поточных производственных системах, каждая из ступеней которых состоит из разнородных параллельных производственных линий, рассматривались в работе [18].

1. ОЦЕНКА НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ДЛИНЫ РАСПИСАНИЯ FLOW-SHOP-PROBLEM

Рассмотрим вначале оценку минимальной длины расписания Flow-Shop-Problem. Ясно, что общая продолжительность расписания не может быть меньше длительности максимального по суммарной длительности выполнения на всех машинах задания

$$F^0 = F \geq \max_{1 \leq i \leq n} \sum_{k=1}^m t_{ik}. \quad (1)$$

Для начала работы каждой k -й машины необходимо, чтобы все операции $l = 1, \dots, k - 1$, предшествующие этой k -й операции, были уже выполнены. Для этого в i -м задании требуется

времени не менее чем $\eta_1(i, k) = \sum_{l=1}^{k-1} t_{il}$ даже в том случае, если в этом задании ни одна из машин не теряет времени на простой после выполнения предыдущей операции. Суммарное время выпол-

нения всех операций на k -й машине равно $\sum_{i=1}^n t_{ik}$.

После того, как операции всех заданий на k -й машине будут выполнены, еще требуется дополнительное время работы машин, $l = k + 1, \dots, m$, равное

$$\eta_2(i, k) = \sum_{l=k+1}^m t_{il}.$$

Это время необходимо для завершения выполнения i -го задания. Следовательно, оценка времени выполнения расписания из условия занятости всех машин определяется выражением

$$F^0 \geq \xi(F) = \max_{1 \leq k \leq n} \left\{ \sum_{i=1}^n t_{ik} + \min_{1 \leq i \leq n} \eta_1(i, k) + \min_{1 \leq i \leq n} \eta_2(i, k) \right\}, \quad (2)$$

а с учетом оценки завершения выполнения отдельных заданий — выражением

$$F^0 \geq \xi(F) = \max \left[\max_{1 \leq k \leq m} \left\{ \sum_{i=1}^n t_{ik} + \min_{1 \leq i \leq n} \eta_1(i, k) + \min_{1 \leq i \leq n} \eta_2(i, k) \right\}, \max_{1 \leq i \leq n} \sum_{k=1}^m t_{ik} \right]. \quad (3)$$

Выражение нижней границы длины расписания в виде (3) известно и широко применяется в литературе для получения точных и оценки приближенных решений этой задачи (см., например, работы [3, 4]).

2. НИЖНЯЯ ГРАНИЦА МИНИМАЛЬНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ДВУХСТАДИЙНОГО РАСПИСАНИЯ

Рассмотрим алгоритмы решения задачи, основанные на последовательных алгоритмах оптимизации. При построении последовательности выполнения заданий вначале определяются альтернативы установки задания на первое место в последовательности, потом на второе место и т. д. Предположим, что время постобработки, которое обозначим b_i , $i = 1, \dots, n$, рассматривается как время выполнения операций на последней машине первой стадии обработки или первой машине второй стадии изготовления изделий, т. е. $m_1 := (m_1 + 1)$ или $m_2 := (m_2 + 1)$.

Пусть $\tilde{I} = \{i = 1, \dots, n\}$ — множество всех изделий, подлежащих обработке, m_1 и m_2 — соответственно число машин на первой и второй стадиях обработки. Обозначим для каждой s -й ветви дерева решения задачи, $s = 0, 1, 2, \dots, S$, где S — число ветвей (вершин) дерева: $x_{ik}^1(s)$ и $x_{ik}^2(s)$ — вре-

мена начала обработки i -го изделия на первой и второй стадиях обработки соответственно на k -й, $k = 1, \dots, m_1$, и l -й, $l = 1, \dots, m_2$, машинах; t_{ik}^1 и t_{il}^2 — времена продолжительности обработки i -го изделия соответственно на первой и второй стадиях обработки на k -й и l -й машинах; $\theta_{ik}^1(s)$ и $\theta_{il}^2(s)$ — времена завершения обработки i -го изделия на k -й и l -й машинах соответственно на первой и второй стадиях обработки; $T_i^1(s)$ и $T_i^2(s)$ — времена завершения изготовления i -го изделия на первой и второй стадиях обработки; $\bar{T}^1(s)$, $\bar{T}^2(s)$ — времена выполнения всех работ на первой и второй стадиях обработки; $\bar{T}(s)$ — время завершения выполнения всех работ двухстадийного расписания; $\xi[\bar{T}^1(s)]$, $\xi[\bar{T}^2(s)]$ и $\xi[\bar{T}(s)]$ — нижняя граница длины расписания на первой и второй стадиях обработки и длины двухстадийного расписания; $\tilde{I}^1(s)$, $\tilde{I}^2(s)$ — подмножество изделий в s -й ветви дерева решения, для которых уже в процессе выполнения алгоритма определено и не определено место в последовательности обработки; $\tilde{I}^1(s) \cup \tilde{I}^2(s) = \tilde{I}$, $\tilde{I}^1(s) \cap \tilde{I}^2(s) = \emptyset$; $\tilde{U}(s) = \{u_1(s), \dots, u_p(s), \dots, u_p(s)\}$ — выбранная для данной s -й ветви дерева решений задачи последовательность двухстадийной обработки изделий.

В начале вычислительного процесса, когда $s = 0$, положим $\tilde{I}^1(s) = \tilde{U}(s) = \emptyset$, $\tilde{I}^2(s) = \tilde{I} = \{i = 1, \dots, n\}$, а также обозначим $\xi(\bar{T}^1) = \xi[\bar{T}^1(s)]$, $\xi(\bar{T}^2) = \xi[\bar{T}^2(s)]$ и $\xi[\bar{T}(s)] = \max\{\xi(\bar{T}^1(s)), \xi(\bar{T}^2(s))\}$.

Определим нижнюю границу длины расписания в начале работы алгоритма решения задачи. Длина двухстадийного расписания $\bar{T}$ не может быть меньше нижней границы длины расписания на каждой из стадий выполнения работ, вычисленной по формуле (3), т. е. $\bar{T} \geq \max[\xi(\bar{T}^1), \xi(\bar{T}^2)]$. Выполнение работ на второй стадии не может начаться ранее завершения изготовления хотя бы одного изделия на первой стадии обработки, т. е. не

ранее времени $\sigma^1 = \min_{1 \leq i \leq n} \sum_{k=1}^{m_1} t_{ik}^1$. Только после завершения обработки одного изделия на первой стадии обработки необходимо начать и завершить выполнение всех работ на второй стадии обработки, что потребует затрат времени не менее, чем

$$\sigma^2 = \min_{1 \leq i \leq n} \sum_{l=1}^{m_2} t_{il}^2.$$

Следовательно, нижняя граница



длины двухстадийного расписания $\bar{T}$ определяется выражением

$$\xi(\bar{T}) = \max \left\{ \min_{1 \leq i \leq n} \sum_{k=1}^{m_1} t_{ik}^1 + \xi(\bar{T}^2); \right. \\ \left. \xi(\bar{T}^1) + \min_{1 \leq i \leq n} \sum_{l=1}^{m_2} t_{il}^2 \right\}. \quad (4)$$

Пусть на некотором шаге вычислительного процесса в s -й ветви дерева решений определены подмножества изделий $\tilde{I}^1(s)$, $\tilde{I}^2(s)$, а также последовательность двухстадийной обработки подмножества изделий $\tilde{I}^1(s)$: $\tilde{U}(s) = \{u_{1,s}, u_{p,s}, \dots, u_{P,s}\}$. Здесь $u_{p,s}$ — задание, стоящее на p -м месте в последовательности, построенной в s -й вершине дерева решений задачи. Времена начала и завершения обработки всех изделий на каждой из машин первой и второй стадий обработки определяются по формулам:

$$x_{u_{1,1}}^1 = 1, x_{u_{1,k}}^1(s) = \theta_{u_{1,k-1}}^1(s) + 1, \\ \theta_{u_{1,k}}^1(s) = \theta_{u_{1,k-1}}^1(s) + t_{u_{1,k}}^1, \quad (5)$$

$$x_{u_{1,1}}^2(s) = \bar{T}_{u_{1,1}}^1(s) + 1, \\ \theta_{u_{1,1}}^2(s) = \bar{T}_{u_{1,1}}^1(s) + t_{u_{1,1}}^2, \quad (6)$$

$$x_{u_{p,1}}^2(s) = \max \left[\bar{T}_{u_{p-1}}^1(s), \theta_{u_{p-1,1}}^2(s) \right] + 1, \\ \theta_{u_{p,1}}^2(s) = x_{u_{p,1}}^2(s) + t_{u_{p,1}}^2 - 1; \quad (7)$$

$$x_{u_{p,k}}^\gamma(s) = \max \left[\theta_{u_{p,k-1}}^\gamma(s), \theta_{u_{p-1,k}}^\gamma(s) \right] + 1,$$

$$\bar{T}_{u_p}^\gamma(s) = \theta_{u_{p,k}}^\gamma(s) = x_{u_{p,k}}^\gamma(s) + t_{u_{p,k}}^\gamma(s) - 1, \\ \gamma = 1, 2, \quad p = 2, \dots, P; \quad k = 2, \dots, m_1, \text{ если } \gamma = 1; \\ k = 2, \dots, m_2, \text{ если } \gamma = 2. \quad (8)$$

Обозначим $X_k^1(s) = \theta_{u_{p,k}}^1(s) + 1$, $k = 1, \dots, m_1$; $X_k^2(s) = \theta_{u_{p,k}}^2(s) + 1$, $k = 1, \dots, m_2$, — соответственно времена начала работы машин изготовления подмножества изделий $\tilde{I}^2(s)$ на первой и второй стадиях обработки в s -й ветви дерева. Пусть последовательность $\tilde{U}(s)$ содержит P изделий. Минимальные времена завершения обработки подмножества изделий $\tilde{I}^2(s) = \{j = i_1^2, i_2^2, \dots, i_g^2, \dots, i_G^2\}$ на первой

и второй стадиях обработки ($\gamma = 1, 2$) на всех машинах не может быть меньше величин

$$\xi[T^1(s)] = \max \left\{ \max_{i \in \tilde{I}^2(s)} \left[X_i^1(s) + \sum_{k=1}^{m_1} t_{ik}^1 \right]; \right. \\ \left. \max_{1 \leq r \leq m_1} \left[X_r^1(s) + \sum_{t \in \tilde{I}^1(s)} t_{ir}^1 + \min_{1 \leq r \leq m_1} \sum_{k=r+1}^{m_1} t_{ik}^1 \right] \right\}, \quad (9)$$

$$\xi[T^2(s)] = \max_{1 \leq r \leq m_2} \left[X_r^2(s) + \sum_{t \in \tilde{I}^1(s)} t_{ir}^2 + \right. \\ \left. + \min_{1 \leq r \leq m_1} \sum_{k=r+1}^{m_1} t_{ik}^1 \right], \quad (10)$$

$$\xi[\bar{T}(s)] = \max \left\{ \xi[T^2(s)]; \xi[T^1(s) + \min_{i \in \tilde{I}^2} \sum_{k=1}^{m_2} t_{ik}^2] \right\}. \quad (11)$$

Оценки (9)—(11) могут быть вычислены для двух вариантов: когда времена постобработки b_i рассматриваются как времена обработки на последней машине первой стадии изготовления; когда они рассматриваются как времена обработки на первой машине второй стадии изготовления. Обозначив оценки этих вариантов соответственно $\xi_1[\bar{T}(s)]$ и $\xi_2[\bar{T}(s)]$, оценка нижней границы решения может быть определена как минимальная из этих оценок, т. е. $\xi[\bar{T}(s)] = \max\{\xi_1[\bar{T}(s)], \xi_2[\bar{T}(s)]\}$.

Кроме того, процесс двухстадийной обработки может рассматриваться как процесс обработки на одной стадии последовательности, состоящей из $M = (m_1 + 1 + m_2)$ машин. Здесь времена постобработки включены в качестве времен обработки на машине, стоящей между первой и второй стадиями изготовления, и для вычисления нижней границы можно воспользоваться формулами (1)—(3) для случая M машин. Оценку, вычисленную в этих условиях, обозначим $\xi_3[\bar{T}(s)]$. Тогда нижняя граница длины двухстадийного расписания определяется выражением

$$\xi[\bar{T}(s)] = \max(\xi_3[\bar{T}(s)]; \max\{\xi_1[\bar{T}(s)], \xi_2[\bar{T}(s)]\}).$$

Рассмотрим два альтернативных варианта построенных подпоследовательностей в процессе решения задачи:

$\tilde{I}^1(s)$, $\tilde{U}(s)$, $\tilde{I}^2(s)$ с параметрами $X_k^1(s)$, $X_k^2(s)$, $i \in \tilde{I}^2(s)$, и $\xi[T^1(s)]$, $\xi[T^2(s)]$, $\xi[\bar{T}(s)]$;

$\tilde{I}^1(p)$, $\tilde{U}(p)$, $\tilde{I}^2(p)$ с параметрами $X_k^1(p)$, $X_k^2(p)$, $i \in \tilde{I}^2(p)$, и $\xi[T^1(p)]$, $\xi[T^2(p)]$.

Правило отсева 1. Если для двух вариантов s и p выполняются условия

$$\tilde{I}^1(s) \subseteq \tilde{I}^1(p), \quad X_k^1(p) \leq X_k^1(s), \quad k = 1, \dots, m_1;$$

$$X_k^2(p) \leq X_k^2(s), \quad k = 1, \dots, m_2,$$

то p -й вариант более предпочтителен, чем вариант s , и вариант s может быть отброшен как неперспективный.

Правило отсева 2 (нестрогое предпочтение). Если для двух вариантов p и s справедливы условия

$$\tilde{I}^1(s) \subseteq \tilde{I}^1(p), \quad \xi[T^1(p)] \leq \xi[T^1(s)]$$

$$\text{и } X_k^2(p) \leq X_k^2(s), \quad k = 1, \dots, m_2,$$

то p -й вариант более предпочтителен, и вариант s может быть отброшен как неперспективный.

Правило отсева 3 (правило нестрогого предпочтения). Если для двух вариантов (ветвей дерева) p и s справедливы условия

$$\tilde{I}^1(s) \subseteq \tilde{I}^1(p), \text{ и } X_{i,m_1}^1(p) \leq X_{i,m_1}^1(s),$$

$$X_{i,m_2}^2(p) \leq X_{i,m_2}^2(s),$$

то вариант p более предпочтителен, чем вариант s , и вариант s может быть отброшен как неперспективный.

Правило предпочтения 1 может применяться в алгоритмах точного решения задачи, а правила 2 и 3 — для получения приближенных решений.

3. АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В начале работы каждого из алгоритмов $s = 0$, $\tilde{I}^1(s) = \tilde{U}(s) = \emptyset$, $\tilde{I}^2(s) = \tilde{I}$. Для каждого из вариантов (вершины дерева решений) введем некоторую метку $w(s)$: $w(s) = 0$, если вариант перспективный и не продолжен во всех возможных направлениях; $w(s) = 1$ — вариант продолжен во всех возможных направлениях; $w(s) = 2$ — вариант отброшен как неперспективный.

Рассмотрим алгоритм решения задачи, основанный на методе ветвей и границ.

Алгоритм 1. Вычислим граничное значение минимального времени завершения выполнения двухстадийного расписания по формуле (4) и определим границу $\xi(\bar{T}) = \xi[\bar{T}(s = 0)]$. Пусть при рассмотрении некоторой s -й вершины дерева уже получено несколько решений задачи $F_l(s)$, $l = 1, \dots$,

$L(s)$, лучшее из которых обозначим $\bar{F}(s) = \min_{1 \leq l \leq L} F_l(s)$

и назовем рекордом. Последовательность выполнения заданий, соответствующую этому расписа-

нию, обозначим $\tilde{\Pi}^s$. Полагаем для $s = 0$, $\tilde{I}^1(s) = \tilde{U}(s) = \emptyset$, $\tilde{I}^2(s) = \tilde{I}$.

Шаг 1. Устанавливаем на первое место в последовательности обработки изделий каждое из этих изделий, образуя ветви дерева $s = 1, 2, \dots, n$. Для каждого из вариантов рассчитываем времена начала и завершения выполнения операций на всех машинах двухстадийного расписания по формулам (5)–(7). Определяем подмножество индексов изделий $\tilde{I}^1(s) = \tilde{U}(s) = \{s\}$, $\tilde{I}^2(s) = (\tilde{I}/s)$, $s = 1, 2, \dots, n$. Вычисляем значения нижней границы длины двухстадийного расписания для каждого из вариантов по формулам (9)–(11). Полагаем для каждого из этих вариантов $w(s) = 0$. Число ветвей дерева $S = n$. Полагаем $w(s = 0) = 1$. Переходим к выполнению шага $s - a$.

Шаг $s - a$. Среди всех ветвей дерева, для которых $w(s) = 0$, находим ветвь с наименьшим значением нижней границы $\xi[\bar{T}^*(s)] = \min_{1 \leq g \leq S} \{\xi[\bar{T}(g)] | w(g) = 0\}$.

Если таких вершин несколько, то выбираем среди них вершину, у которой подмножество $\tilde{I}^1(s)$ содержит максимальное число элементов. Для выбранной s -й вершины дерева определены подмножество $\tilde{I}^1(s)$ и последовательность $\tilde{U}(s) = \{u_{1,s}, \dots, u_{p,s}, \dots, u_{p,s}\}$. Полагаем для выбранной вершины дерева $w(s) = 1$. Переходим к шагу $s - b$.

Шаг $s - b$. Вычислим (или известны) времена начала и завершения обработки последнего стоящего в последовательности $\tilde{U}(s)$ изделия $u_{p,s}$ на всех машинах первой и второй стадий обработки. Устанавливаем на последнее, т. е. $(u_{p,s} + 1)$ -е, место в последовательности обработки изделий каждое из изделий подмножества $\tilde{I}^2(s)$, число которых равно $R(s) = n - P(s)$, образуя ветви дерева с индексами $q = S + 1, S + 2, \dots, S + R(s)$. Для каждого из вновь образованных вариантов рассчитываем времена начала и завершения выполнения операций на всех машинах двухстадийного расписания по формулам (5)–(8). Определяем подмножество индексов изделий $\tilde{I}^1(q) = \{\tilde{I}^1(s) \cup q\}$, $\tilde{I}^2(q) = \{\tilde{I}^2(s)/q\}$, $\tilde{U}(q) = \{u_1(s), \dots, u_{R(s)}(s), q\}$. Вычисляем по формулам (9)–(11) значения нижней границы длины двухстадийного расписания каждого из вариантов $\xi[\bar{T}(s)]$, $s = S + 1, S + 2, \dots, S + R(s)$. Переходим к шагу $s - c$.

Шаг $s - c$. Если для какой-то из вновь образованной вершины $\xi[\bar{T}(s)] \geq \bar{F}(s)$, то полагаем для этой вершины $w(s) = 2$. Если для некоторой из вновь образованных вершин $\tilde{I}^2(\lambda) = \emptyset$, то полу-



чено одно из решений задачи и $\xi[\bar{T}(\lambda)] = F(\lambda)$. Если $F(\lambda) < \bar{F}(s)$, то полагаем $\bar{F}(s) = F(\lambda)$. Если при этом $\bar{F}(s) \leq \min_{1 \leq s \leq S} \{\xi[\bar{T}(s)|w(s) = 0]\}$, то получено решение задачи, и алгоритм завершает свою работу. В противном случае, если для какой-то из этих вершин дерева выполняется правило отсева 1 (или выполняются правила отсева 2 или 3 для получения приближенных решений в условиях большой размерности), то полагаем для этого варианта $w(s) = 2$. Для всех остальных вновь образованных вершин дерева полагаем $w(s) = 0$. Переходим к шагу $s - a$.

Ясно, что через некоторое число шагов будет получено оптимальное решение.

Приближенное решение задачи на основе метода ветвей и границ может быть получено при реализации односторонней схемы ветвления до получения первого решения «рекорда», не обращая внимание на то, что в дереве решений есть вершины, для которых $w(s) = 0$ и $\bar{F}(s) > \bar{T}(s)$. При этом первое полученное двухстадийное расписание, для которого $\tilde{I}^1(s) = \tilde{I}$, принимается в качестве решения задачи.

Алгоритм 2 (решение задачи методом динамического программирования). Пусть S — суммарное число построенных вариантов (вершин дерева решений). В начале работы алгоритма $S = 0$. Наилучшее из построенных решений на предыдущих шагах алгоритма обозначим $\bar{F}(S)$. На каждом s -м шаге работы алгоритма находим вариант, у которого $w(s) = 0$, определены подмножества $\tilde{I}^1(s)$, $\tilde{I}^2(s)$ и последовательность $\tilde{U}(s) = \{u_1(s), u_2(s), \dots, u_R(s)\}$, а также вычисленные значения $X_k^1(s)$ и $X_k^2(s)$, вариант с наименьшим значением длины выполнения расписания для уже построенной подпоследовательности обработки $\tilde{U}(s)$, т. е. с наименьшим значением $\bar{T}[\tilde{U}(s)] = \min_{1 \leq s \leq S} \bar{T}[\tilde{U}(s)]$. Если $\tilde{I}^1(\bar{s}) = \tilde{I}$ и $\tilde{I}^2(\bar{s}) = \emptyset$, то переходим к п. 3. В противном случае переходим к п. 1. В дальнейшем для простоты изложения полагаем $s := \bar{s}$ и выполняем вычисления п. 1.

1. На последнее место в подпоследовательности $\tilde{U}(s)$ устанавливаем каждое из изделий подмножества $\tilde{I}^2(s) = \{i_1^2(s), \dots, i_g^2(s), \dots, i_G^2(s)\}$ и определяем новые подмножества вариантов

$$\begin{aligned}\tilde{I}^1(s + g) &= \{\tilde{I}^1(s) \cup i_g^2(s)\}, \\ \tilde{I}^2(s + g) &= \{\tilde{I}^2(s)/i_g^2(s)\},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tilde{U}(s + g) &= \{u_1(s), u_2(s), \dots, u_R(s), i_g^2(s)\}, \\ g &= 1, \dots, G.\end{aligned}$$

Вычисляем по ниже приведенным формулам времена начала и завершения задания, стоящего последним в каждой из этих подпоследовательностей, на всех машинах:

$$\begin{aligned}x(i_g^2(s), k) &= \max\{\theta(u_{Rp}^s, k), \theta(i_g^2(s), k - 1)\} + 1, \\ \theta(i_g^2(s), k) &= x(i_g^2(s), k) + t(i_g^2(s), k) - 1, \\ g &= 1, \dots, G.\end{aligned}$$

Полагаем $w(s) = 1$, $w(s + g) = 0$. Образует новые варианты $p = S + g$, для которых

$$\begin{aligned}\tilde{I}^1(S + g) &= \tilde{I}^1(s + g) \cup i_g^2(s), \\ \tilde{I}^2(S + g) &= \{\tilde{I}^2(S + g)/i_g^2(s)\}, \\ \tilde{U}(S + g) &= \{u_1(s), u_2(s), \dots, u_R(s), u_{R+1}(s) = i_g^2(s)\}, \\ g &= 1, \dots, G.\end{aligned}$$

Вычисляем для каждого из вновь образованных вариантов времена начала и завершения обработки изделия с индексом $i_g^2(s) = u_{R+1}(s)$, стоящего последним в последовательности $\tilde{U}(S + g)$ на всех машинах первой и второй стадий обработки, а также значения $X_k^1(S + g)$ и $X_k^2(S + g)$. Переходим к п. 2.

2. Последовательно для каждого из вариантов $s = (S + g)$, $g = 1, \dots, G$, выполняем следующие действия. Если построена последовательность, для которой $\tilde{I}^1(S + g) = \tilde{I}$, то получено решение задачи, которое обозначим $F[\tilde{U}(S + g)]$. Если $F[(S + g)] \leq \{\bar{T}[\tilde{U}(s)]|w(s) = 0\}$, то получено решение задачи и переходим к п. 3. В противном случае, если $F[(S + g)] \leq \bar{F}(S)$, то полагаем $\bar{F}(S) = F[(S + g)]$. Для всех вариантов, для которых $w(s) = 0$ или $w(s) = 1$ и выполняются условия $\bar{T}[\tilde{U}(s)] \geq \bar{F}(S)$ либо выполняются правила отсева 1 (либо в случае получения приближенных решений правила отсева 2 или 3), полагаем $w(s) = 2$. Вычисляем новое значение числа образованных вариантов $S := (S + g)$. Переходим к п. 1.

3. Для полученной оптимальной последовательности обработки изделий $\tilde{U}^*(s) = \arg \bar{F}(S)$ вычисляем времена начала и завершения обработки изделий на всех машинах каждой стадии их изготовления, а также времена начала и завершения постобработки между этими стадиями. Здесь

$\arg \bar{F}(S)$ — последовательность обработки изделий в оптимальном решении. На этом алгоритм решения задачи завершает свою работу.

4. ЭВРИСТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ПРИБЛИЖЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Для решения задачи на двух машинах наиболее эффективен полиномиальный по времени алгоритм Джонсона [9, 10]. Все изделия разбиваются на две группы. Первая из них включает в себя изделия, для которых $\bar{t}_i^1 \leq \bar{t}_i^2$, а вторая — для которых $\bar{t}_i^1 > \bar{t}_i^2$. Изделия первой группы упорядочиваются по неубыванию времен $\bar{t}_i^1$ в последовательности $\tilde{V}^1 = \{v_1^1, v_2^1, \dots, v_{l-1}^1, v_l^1, \dots, v_L^1 | \bar{t}_{l-1}^1 \leq \bar{t}_l^1, l = 2, \dots, L\}$, а изделия второй группы — по невозрастанию времен $\bar{t}_i^2$ в последовательности $\tilde{V}^2 = \{v_1^2, v_2^2, \dots, v_{r-1}^2, v_r^2, \dots, v_R^2 | \bar{t}_{r-1}^2 \geq \bar{t}_r^2, r = 2, \dots, R\}$. Обработка изделий на двух машинах осуществляется в последовательности

$$\tilde{V} = \{v_1^1, v_2^1, \dots, v_{l-1}^1, v_l^1, \dots, v_L^1, v_1^2, v_2^2, \dots, v_{r-1}^2, v_r^2, \dots, v_R^2\}.$$

Доказано [10], что в случае двух машин данный алгоритм обеспечивает оптимальное решение задачи и имеет полиномиальную сложность порядка $O(n^2)$. Данная эвристика может быть применена для получения приближенного решения сформулированной в данной работе задачи. Рассмотрим два варианта расчета значений $\bar{t}_i^1$ и $\bar{t}_i^2$:

$$\begin{aligned} \bar{t}_i^1 &= \sum_{k=1}^{m_1} \bar{t}_{ik}^1, & \bar{t}_i^2 &= \sum_{k=1}^{m_2} \bar{t}_{ik}^2 + b_i; \\ \bar{t}_i^1 &= \sum_{k=1}^{m_1} \bar{t}_{ik}^1 + b_i, & \bar{t}_i^2 &= \sum_{k=1}^{m_2} \bar{t}_{ik}^2. \end{aligned} \quad (12)$$

Для каждого из этих вариантов решаем задачу построения расписания для двух машин описанным выше алгоритмом Джонсона. При этом значения времен выполнения заданий рассчитываются по формулам (5)—(8). Пусть для построенных последовательностей значения критериев оптимальности соответственно равны $\bar{T}^1$ и $\bar{T}^2$. В качестве решения задачи выбираем вариант и соответствующую последовательность двухстадийной обработки на всех машинах с наименьшим значением

критерия оптимальности, т. е. $\bar{T} = \min(\bar{T}^1, \bar{T}^2)$. Описанный алгоритм, как и алгоритм Джонсона, имеет полиномиальную сложность и требует только в два раза большего объема вычислений.

Для получения более точных приближенных решений могут быть рассмотрены и другие варианты вычисления суммарного времени выполнения операций на каждой из двух машин:

$$\begin{aligned} \bar{t}_i^1 &= \sum_{k=1}^{\delta_1} \bar{t}_{ik}^1, & \bar{t}_i^2 &= \sum_{k=\delta_1+1}^{m_1} \bar{t}_{ik}^1 + \sum_{k=1}^{m_2} \bar{t}_{ik}^2 + b_i; \\ \bar{t}_i^1 &= \sum_{k=1}^{m_1} \bar{t}_{ik}^1 + b_i + \sum_{k=1}^{\delta_2} \bar{t}_{ik}^1, & \bar{t}_i^2 &= \sum_{k=\delta_2+1}^{m_2} \bar{t}_{ik}^2, \end{aligned} \quad (13)$$

где $\delta_1 = 1, 2, \dots, (m_1 - 1)$, $\delta_2 = 1, 2, \dots, (m_2 - 1)$.

Для каждого из этих вариантов строится последовательность выполнения заданий алгоритмом Джонсона. В каждой из построенных последовательностей все времена начала и завершения заданий вычисляем по формулам (5)—(8). Среди всех рассмотренных вариантов, включая варианты, образованные по правилам (12), (13), выбирается последовательность с наименьшим значением критерия оптимальности.

Отметим, что если критерий оптимальности существенно отличается от значения нижней границы оптимального решения, то полученное решение можно попытаться улучшить алгоритмом локальных вариаций, последовательно меняя два члена, стоящие рядом в последовательности.

5. ИЛЛЮСТРАТИВНЫЙ ПРИМЕР

Времена обработки пяти изделий на каждой из машин первой и второй стадий обработки представлены в табл. 1. Первая и вторая стадии предусматривают выполнение трех операций на трех машинах. Времена постобработки изделий $\bar{b} = (5, 6, 8, 10, 9)$. Обработка каждого из изделий должна вестись на машинах, расположенных в заданной последовательности. Не допускается прерываний в процессе обработки на каждой из машин. Начало обработки изделий на первой машине второй стадии может начаться только после завершения обработки его на третьей машине первой стадии и последующей постобработки. Необходимо найти последовательность обработки изделий, обеспечивающую минимальное время выполнения расписания, т. е. всех работ на двух стадиях.

Времена работы машин для случаев, когда времена постобработки $\bar{b}$ рассматриваются как времена работы машин первой или второй стадий изготовления, приведены соответственно в табл. 1 и 2.



Вычислим нижнюю границу минимального времени выполнения расписания. По формулам (9)–(11) вычисляем

$$\xi_1[T_1(s)] = \max(25 + 13, 3 + 38 + 8, 10 + 45) = 55,$$

$$\xi_1[T_2(s)] = \max(38 + 17, 5 + 33 + 10, 10 + 34 + 3, 18 + 30) = 55,$$

$$\xi_1[\bar{T}(s)] = \max(55 + 22, 55 + 1) = 77;$$

$$\xi_2[T_1(s)] = \max(25 + 19, 4 + 38 + 13, 10 + 45 + 5, 19 + 38) = 60,$$

$$\xi_2[T_2(s)] = \max(33 + 10, 2 + 34 + 3, 11 + 30) = 43,$$

$$\xi_2[\bar{T}(s)] = \max(60 + 17, 43 + 19) = 77;$$

$$\xi_3[\bar{T}(s)] = \max(25 + 13 + 22, 3 + 38 + 8 + 22, 10 + 45 + 22, 19 + 38 + 19, 19 + 33 + 10, 5 + 19 + 34 + 3, 19 + 17 + 30) = 77;$$

$$\xi[\bar{T}(s)] = \max(77; \max[77, 77]) = 77.$$

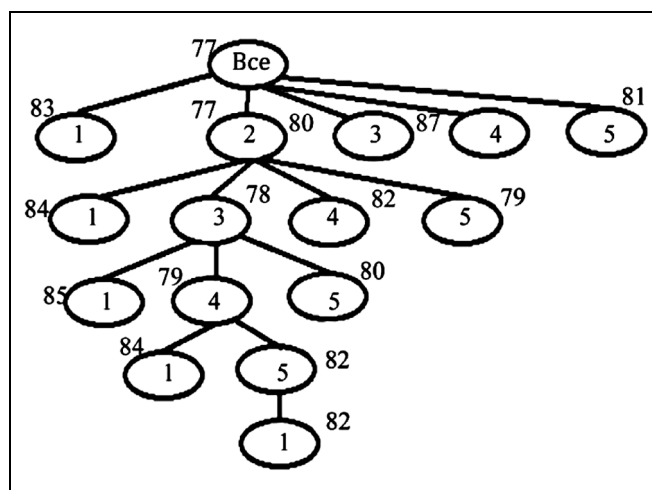


Рис. 1. Дерево приближенного решения задачи

Таблица 1

Времена выполнения работ на машинах первой и второй стадий (первый вариант)

Номер задания	Времена выполнения заданий на машинах первой и второй стадий (t_{ik}^1 и t_{ik}^2)								
	Машины первой стадии				Машины второй стадии				
	1	2	3	$\sum_{k=1}^3 t_{ik}^1$	1	2	3	4	$\sum_{k=1}^4 t_{ik}^2$
1	5	7	8	20	5	7	6	4	22
2	6	4	9	19	6	10	7	3	26
3	3	10	8	21	8	2	9	10	29
4	7	7	11	25	10	8	5	6	29
5	4	10	9	23	9	6	7	7	29
$\sum_{k=1}^5 t_{ik}^r$	25	38	45	—	38	33	34	30	—

Таблица 2

Времена выполнения работ на машинах первой и второй стадий (второй вариант)

Номер задания	Времена выполнения заданий на машинах первой и второй стадий (t_{ik}^1 и t_{ik}^2)								
	Машины первой стадии					Машины второй стадии			
	1	2	3	4	$\sum_{k=1}^3 t_{ik}^1$	1	2	3	$\sum_{k=1}^4 t_{ik}^2$
1	5	7	8	5	25	7	6	4	17
2	6	4	9	6	25	10	7	3	20
3	3	10	8	8	29	2	9	10	21
4	7	7	11	10	35	8	5	6	19
5	4	10	9	9	32	6	7	7	20
$\sum_{k=1}^5 t_{ik}^r$	25	38	45	38	—	33	34	30	—

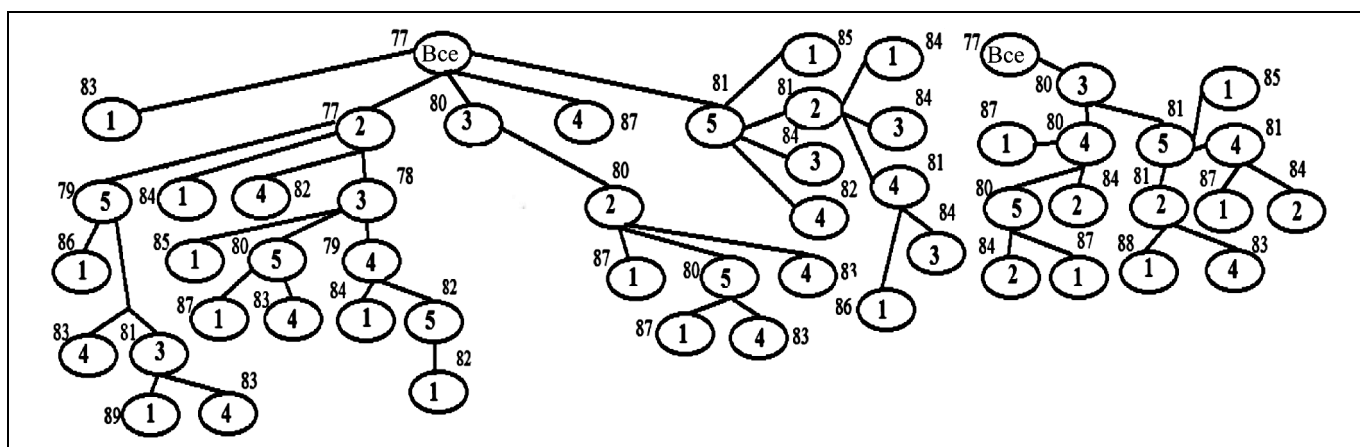


Рис. 2. Дерево точного решения задачи

Приближенное решение задачи получено с помощью алгоритма ветвей и границ в условиях, когда развивается только одна ветвь дерева решений с выбором вершины с наилучшим значением нижней границы (алгоритм одностороннего ветвления с целью получения «рекорда»). Дерево решений задачи приведено на рис. 1. Цифры, расположенные рядом с вершинами дерева, — значения нижней границы данной ветви. Полученное оптимальное значение последовательности обработки изделий $\tilde{U} = \{2, 3, 4, 5, 1\}$. Время выполнения расписа-

ния $T(\tilde{U}) = 82$. Времена завершения выполнения всех заданий на каждой из машин первой и второй стадий обработки приведены в табл. 2.

В табл. 3 приведены времена завершения выполнения заданий на машинах первой и второй стадий в построенном расписании.

Отметим, что полученное приближенное решение задачи методом ветвей и границ является оптимальным и совпадает с точным решением задачи, полученным методом ветвей и границ (рис. 2). Большой объем вы-

Таблица 3

Времена завершения выполнения заданий в оптимальном решении

Номер задания	Времена завершения выполнения заданий на машинах первой и второй стадий (θ_{ik}^1 и θ_{ik}^2)						
	Машины первой стадии			Машины второй стадии			
	1	2	3	1	2	3	4
2	6	10	19	25	35	42	45
3	9	20	28	36	38	47	57
4	16	27	39	49	57	62	68
5	20	37	48	58	64	71	78
1	25	44	56	63	70	78	82

Таблица 4

Времена завершения выполнения заданий на машинах (первое решение)

Номер задания	Времена завершения выполнения заданий на машинах первой и второй стадий (θ_{ik}^1 и θ_{ik}^2)						
	Машины первой стадии				Машины второй стадии		
	1	2	3	4	1	2	3
3	3	13	21	25	31	40	50
2	9	11	30	36	46	53	56
5	13	27	39	48	52	60	68
4	20	34	50	60	68	73	79
1	25	41	58	65	72	78	83

Времена завершения выполнения заданий на машинах (второе решение)

Номер задания	Времена завершения выполнения заданий на машинах первой и второй стадий (θ_{ik}^1 и θ_{ik}^2)						
	Машины первой стадии			Машины второй стадии			
	1	2	3	1	2	3	4
1	5	20	21	25	32	38	42
2	11	16	29	35	45	52	55
3	14	26	37	45	47	61	71
5	18	36	46	55	61	68	75
4	25	43	57	67	75	80	86

числений был необходим только для доказательства оптимальности полученного приближенного решения задачи. Такое большое число вершин дерева объясняется близкими значениями времен обработки изделий на машинах в рассматриваемом примере.

Рассмотрим приближенное решение задачи. Если времена постобработки включены в первую стадию обработки изделий, то $\bar{t}^1 = \{25, 25, 29, 35, 32\}$ и $\bar{t}^2 = \{17, 20, 19, 23, 22\}$. Так как $\bar{t}_i^1 > \bar{t}_i^2$, $i = 1, \dots, 5$, то последовательность по неубыванию времен $\bar{t}_i^1$ имеет вид $\bar{U}^1 = \{2, 3, 1, 5, 4\}$. Расписание выполнения работ обработки изделий в данной последовательности представлено в табл. 4; $\bar{T}(\bar{U}^1) = 83$.

Если времена постобработки включены во вторую стадию обработки изделий, то $\bar{t}^1 = \{20, 19, 21, 25, 23\}$ и $\bar{t}^2 = \{22, 26, 29, 29, 29\}$. Так как $\bar{t}_i^1 < \bar{t}_i^2$, $i = 1, \dots, 5$, то последовательность по невозрастанию времен $\bar{t}_i^1$ имеет вид $\bar{U}^2 = \{1, 2, 3, 5, 4\}$, и расписание выполнения работ обработки изделий в данной последовательности представлено в табл. 5; $\bar{T}(\bar{U}^2) = 86$. Так как $\bar{T}(\bar{U}^1) < \bar{T}(\bar{U}^2)$, то $\bar{T}(\bar{U}^1) = 83$ принимается в качестве приближенного решения задачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построение расписаний двухстадийной обработки множества изделий на двух последовательно расположенных в цепочку системах машин имеет много практических приложений в календарном планировании. Необходимо найти последовательность обработки изделий, времена начала и завершения обработки каждого изделия на всех машинах двух стадий изготовления, обеспечивающие выполнение всех работ на обеих стадиях обработки в кратчайшие сроки. Даже в условиях, когда все

изделия как на первой стадии, так и на второй стадии изготовления обрабатываются в одной и той же и одинаковой для всех изделий последовательности, рассматриваемая задача относится к классу *NP*-полных задач и является обобщением известной в теории расписаний *Flow-Shop-Problem*. Рассмотренные постановки задачи и предложенные в работе точные методы, а также приближенные методы и эвристические алгоритмы полиномиальной сложности решений этих задач могут найти широкое применение в системах календарного планирования работы участков и цехов машиностроительного и приборостроительного производства, а также в процессах деревообработки, электронной и легкой промышленности. Оценка эффективности полученных приближенных решений может быть выполнена в сравнении с вычисленной нижней границей оптимальной длительности выполнения расписания.

Решение рассмотренных проблем в условиях ограничений на времена завершения выполнения заданий и допустимые сроки работы машин, которое может быть предметом дальнейших исследований, позволит также более обоснованно оценить возможности выполнения заказов и планировать время технического обслуживания машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конвей Р.В., Максвелл В.Л., Миллер Л.В. Теория расписаний. — М.: Наука, 1975. — 359 с. [Konvey, R.W., Maxwell, W.L., Miller, L.W. Teorija raspisanij. — М.: Nauka, 1975. — 359 s. (In Russian)]
2. Танаев В.С., Сотсков Ю.Н., Струсович В.А. Теория расписаний. Многостадийные системы. — М.: URSS, 1989. — 328 с. [Tanajev, V.S., Sotskov, Yu.N., Strusevitsh, V.A. Teorija raspisanij. Mnogostadijnije sistemi. — М.: URSS, 1989. — 328 s. (In Russian)]
3. Зак Ю.А. Прикладные задачи теории расписаний и маршрутизации перевозок. — М.: URSS, 2012. — 394 с. [Zack, Yu.A. Prikladnija zadachi teorii raspisanij i marshrutisazii perevosok. — М.: URSS, 2012. — 394 s. (In Russian)]

4. Зак Ю.А. Решение обобщенной задачи Джонсона с ограничениями на сроки выполнения заданий и времени работы машин. Ч. 1. Точные методы решения. // Проблемы управления. — 2010. — № 3. — С. 17–25. Ч. 2. Приближенные методы // Проблемы управления. — 2010. — № 4. — С. 12–19. [Zack, Yu.A. Reshenije obobchennoj zadachi Dczonsona s ogranichenijam na sroki vipolnenija zadaniy i vremena raboti mashin. Ch. 1. Tochnije metodi reshenija. // Control Sciences. — 2010. — No. 3. — S. 17–25. Ch. 2; Priblizennije metodi. — 2010. — No. 4. — S. 12–19. (In Russian)]
 5. Brucker, P. Scheduling Algorithms. — Berlin, Heidelberg und New-York: Springer-Verlag, 1998. — 312 p.
 6. Domschke, W., Scholl, A., Voß, S. Produktionsplanung. Ablauforganisatorische Aspekte. — Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2005. — 456 p.
 7. Ho, J.C., Chang, Y.-L. A New Heuristic for the n -job, M -machine Problem // European Journal of Operational Research. — 1991. — Vol. 52, iss. 2. — P. 194–202.
 8. Ogbu, F.A., Smith, D.K. The Application of the Simulated Annealing Algorithm to the Solution of the $n/m/C_{\max}$ Flow-shop Problem // Computer & Operations Research. — 1990. — Vol. 17. — P. 243–253.
 9. Ogbu, F.A., Smith, D.K. Simulated Annealing for the Permutation Flow-shop Problem // OMEGA. — 1991. — P. 64–67.
 10. Hundal, T.S., Rajgopal, J. An Extension of Palmer's Heuristic for the Flow-shop Scheduling Problem // International Journal of Production Research. — 1988. — Vol. 26. — P. 1119–1124.
 11. Garey, M.R., Johnson, D.S., & Sethi, R. The Complexity of Flowshop and Jobshop Scheduling // Mathematics of Operations Research. — 1976. — Vol. 1, iss. 2. — P. 117–129.
 12. Лушакова И.Н., Струевич В.А. Двухстадийные системы с нефиксированными маршрутами и ресурсными ограничениями // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 1989. — Т. 29, № 9. — С. 1393–1407. [Lushakova, I.L., Strusevitch, V.A. Dwuchstadijnije sistemi s nefiksirovannimi marshrutami i resursnimi ogranichenijami // Zhurnal vychislitelnoj matematiki i matematicheskoj fiziki. — 1989. — Vol. 29, No. 9. — S. 1393–1407. (In Russian)]
 13. Зак Ю.А. Построение двухстадийных расписаний обработки изделий на одной машине // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2018. — № 4. — С. 19–36. [Zack, Yu.A. Postrojenije dvuchstadijnich raspisanij obrabotki izdelij na odnoj mashine // Sistemi doslidzhennya ta informazijnij tehnologii. — 2018. — No. 4. — P. 19–36. (In Russian)]
 14. Johnson, S.M. Optimal Two-and Three-stage Production Schedules with Setup Times Included // Naval Research Logistics Quarterly. — 1954. — Vol. 1, iss. 1. — P. 61–68.
 15. Henry, H.Y.K., Yu, L.Ch. A Two Stage Heuristic Algorithm for the Integrated Aircraft and Crew Schedule Recovery Problems // Computer & Industrial Engineering. — 2015. — Vol. 87. — P. 436–453.
 16. Guerreschim, G.G., Park, Jo. Two-step Approach to Scheduling Quantum Circuits // Quantum Science and Technology. — 2018. — Vol. 3, No. 4. — P. 212–219.
 17. Yin, Ai-H., Zhao, Xi-P. A Two-step Approach for Solving the Flexible Job Shop Scheduling Problem // The 2009 IEEE Int. Conf. on Granular Computing, GrC, Lushan Mountain, Nanchang, China, 17–19 August, 2009.
 18. Seenner, F., Mey, H. Multi-stage Simultaneous Lot-sizing and Scheduling for Flow Line Production // OR Spectrum. — 2013. — Vol. 35, No. 1. — P. 33–73.
- Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Лазаревым.
- Поступила в редакцию 15.02.2019, после доработки 31.07.2019.
Принята к публикации 31.07.2019.
- Зак Юрий Александрович — д-р техн. наук, науч. эксперт и консультант, г. Аахен, Германия, ✉ yuriy_zack@hotmail.com.

TWO-STAGE PLANNING TASKS FOR THE FLOW LINE

Yu.A. Zack

✉ yuriy_zack@hotmail.com

Abstract. The problem is formulated of constructing schedules of the two-stage processing of large number of products on two machine systems arranged into a sequential chain, keeping the same sequence for all products. The number of machines at each stage of processing can be different. None of the operations performed allows for interruptions during its execution. Post-processing time losses after completion of the 1st stage of manufacturing are also taken into account. As the optimality criterion, the implementation of the whole range of work in the shortest possible time is considered. Estimates are obtained of the lower bound of the optimal sequence of products processing, ensuring the implementation of all works at two stages of the processing in the shortest possible time. Algorithms are proposed of the exact and the approximate solution of the problem by the branch and bound method and the dynamic programming method, as well as a heuristic algorithm of polynomial complexity for obtaining the approximate solutions. The decision algorithms are illustrated with a numerical example. The results obtained can be widely used in work scheduling systems for the production sectors and workshops of machine-building and instrument-making production, as well as for the processes in woodworking, electronics and light industry.

Keywords: two-stage schedules, flow-shop-problem, optimal sequences, branch and bound method, dynamic programming, heuristic algorithm.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ ПОТОКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ПОСАДКУ¹

Е.Л. Кулида, В.Г. Лебедев, Н.А. Егоров

Аннотация. Рассмотрена задача оптимизации последовательности приземления воздушных судов. Представлены формальная постановка задачи формирования оптимальной очереди воздушных судов на посадку, основные ограничения и целевые функции. С целью получения решения в режиме реального времени проиллюстрированы способы оптимизации исходной последовательности и предложен эвристический алгоритм приближенного решения задачи. В качестве исходной последовательности для работы алгоритма выбрана последовательность, при которой воздушные суда приземляются в порядке прибытия. В процессе применения алгоритма исходное решение, соответствующее исходной последовательности, не может быть ухудшено. Проведены вычислительные эксперименты с целью исследования эффективности предложенного алгоритма. Сравнены времена счета и качество исходного решения, эвристического решения, полученного при помощи предлагаемого эвристического алгоритма, и оптимального решения, полученного при помощи стандартного пакета CPLEX. Отмечено, что для задачи большой размерности (при большом числе воздушных судов) оптимальное решение получить не удастся, поэтому эвристическое решение сравнивалось с исходным. Тесты для интенсивных потоков воздушных судов генерировались случайным образом. Предложенный алгоритм позволил за приемлемое время получать решения задачи либо оптимальные (30–52% случаев), либо значительно улучшающие исходное решение.

Ключевые слова: последовательности воздушных судов, целевая функция, оптимальное решение, эвристический алгоритм, вычислительный эксперимент.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из важных научно-практических проблем заключается в автоматизации управления потоками воздушного движения в целях обеспечения безопасного, упорядоченного и ускоренного воздушного движения, уменьшения издержек авиакомпаний и пассажиров, уменьшения негативного влияния на окружающую среду. Анализ мирового и отечественного опыта показывает, что построение оптимальных очередей воздушных судов (ВС) при маневрировании в зоне аэропорта в целях повышения эффективности использования взлетно-посадочных полос — одна из важных задач при пла-

нировании и регулировании потоков воздушного движения [1, 2].

Задача формирования оптимальных очередей ВС на посадку ставится как задача линейной или квадратичной оптимизации (в зависимости от выбранной целевой функции) с использованием $\sim P^2$ целочисленных переменных для учета необходимых ограничений на минимальное время разделения между ВС, где P — число ВС [1]. В этой связи применение стандартных методов оптимизации приводит к экспоненциальному росту времени счета с ростом P . Поэтому для решения задачи в режиме реального времени, когда решение необходимо постоянно и очень быстро, в течение нескольких секунд, пересчитывать, становится неизбежным применение эвристических алгоритмов для сокращения перебора с учетом знаний об особенностях данной задачи [3].

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-08-00822а) и программы I30 Президиума РАН.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматриваемая постановка задачи формирования оптимальной очереди ВС на посадку представляет собой модификацию классической постановки [4].

Обозначения:

P — число ВС, ожидающих посадку;

E_i — самое раннее возможное время приземления i -го ВС, $i = \overline{1, P}$;

L_i — самое позднее возможное время приземления i -го ВС;

T_i — оптимальное время прибытия i -го ВС;

C_i — категория турбулентности i -го ВС;

$S_{c_i c_j}$ — минимальный интервал между посадкой ВС категории турбулентности c_j после ВС категории турбулентности c_i , $i, j = \overline{1, P}$, $i \neq j$.

Для примера рассмотрим ВС трех категорий турбулентности: легкие, средние и тяжелые; в табл. 1 представлен пример матрицы $S_{c_i c_j}$.

Переменные:

x_i — время приземления i -го ВС, $i = \overline{1, P}$;

$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если ВС } i \text{ приземляется раньше ВС } j, \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$

$i, j = \overline{1, P}$, $i \neq j$.

Ограничения:

1) приземление ВС с номером i должно происходить внутри временного окна $[E_i, L_i]$:

$$E_i \leq x_i \leq L_i, \quad i = \overline{1, P}.$$

2) либо ВС i приземляется раньше ВС j ($\delta_{ij} = 1$), либо ВС j приземляется раньше ВС i ($\delta_{ji} = 1$):

$$\delta_{ij} + \delta_{ji} = 1, \quad i, j = \overline{1, P}.$$

3) ограничения по соблюдению необходимых интервалов между ВС можно представить в виде:

$$x_j \geq x_i + S_{c_i c_j} \delta_{ij} - (L_i - E_j) \delta_{ji}, \quad i, j = \overline{1, P}, \quad i \neq j.$$

Таблица 1

Минимальное время между приземлениями, с

Ведомый	Ведущий		
	Легкий	Средний	Тяжелый
Легкий	60	120	180
Средний	60	120	120
Тяжелый	60	120	120

4) для учета интересов пассажиров, авиакомпаний и др. иногда дополнительно вводится ограничение — максимальный сдвиг p : ВС не может сдвигаться дальше, чем на p позиций от его начальной позиции в FCFS-последовательности.

Назовем исходной или FCFS-последовательностью (First-Come, First-Served) такую последовательность ВС, при которой ВС упорядочены в соответствии с оптимальными временами посадок T_i . Если ВС занумерованы в соответствии FCFS-последовательностью, при упорядочении в соответствии с временем посадки x_i получается новая последовательность $Y = \{y_i, i = \overline{1, P}\}$, где y_i — номер ВС. Эту последовательность будем называть оптимальной последовательностью ВС на посадку.

Тогда ограничение представляется в виде:

$$\text{abs}(y_i - i) \leq p, \quad i = \overline{1, P}.$$

Целевые функции:

— кусочно-линейная целевая функция — минимизация суммы модулей отклонений от оптимальных времен посадок:

$$\min_X \sum_{i=1}^P |(T_i - x_i)|,$$

где $X = \{x_i, i = \overline{1, P}\}$;

— нелинейная целевая функция — минимизация суммы квадратов отклонений от оптимальных времен посадок:

$$\min_X \sum_{i=1}^P (T_i - x_i)^2.$$

2. ОПТИМИЗАЦИЯ ОЧЕРЕДЕЙ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ПОСАДКУ

Общие требования к алгоритмам оптимизации очередей ВС:

— возможность реализации в режиме реального времени;

— возможность работы с большим потоком ВС;

— учет требований по безопасности и технической реализуемости;

— учет ограничений и внешних факторов.

Время решения задачи с помощью программного пакета CPLEX варьируется от нескольких секунд до многих часов.

Для практического применения в режиме реального времени, когда некоторые ВС приземляются и в зоне аэропорта появляются новые ВС, решение нужно часто, каждые несколько минут, пересчитывать. Для этого разработан эвристический алгоритм приближенного решения поставленной

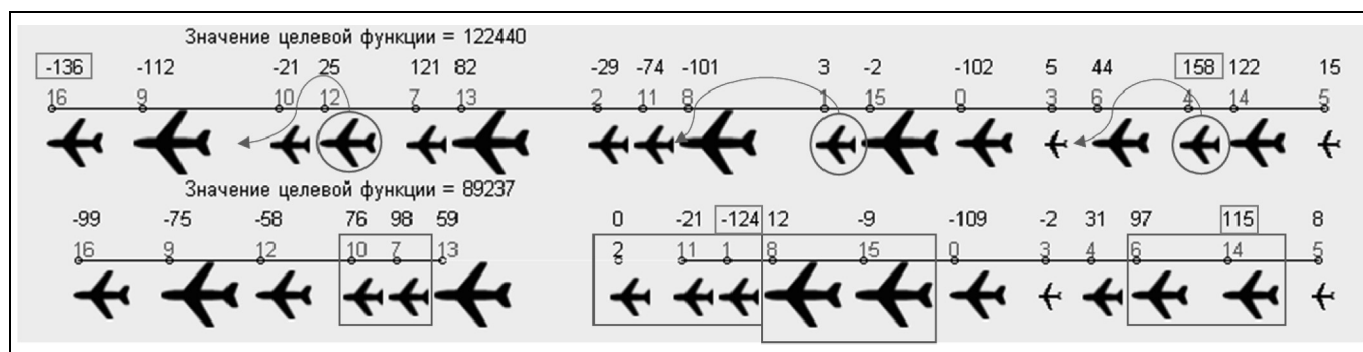


Рис. 1. Пример 1

задачи. Он не всегда приводит к оптимальному решению, но позволяет получить хорошее решение за приемлемое время.

Для оценки эффективности предлагаемого алгоритма используются точные решения, которые могут быть получены, но не применимы на практике в режиме реального времени из-за большого времени счета.

Задача формирования оптимальных очередей ВС на посадку разбивается на две подзадачи. Первая из них заключается в определении фиксированной последовательности ВС на посадку $Y = \{y_i, i = \overline{1, P}\}$, y_i — номер ВС в последовательности FCFS, занимающего i -ю позицию в последовательности Y . Вторая подзадача заключается в назначении при фиксированной последовательности Y каждому ВС времени посадки $X^* = \{x_i^* = x^*[y_i], i = \overline{1, P}\}$ таким образом, чтобы минимизировать заданную целевую функцию $X^* = \min_X F(X)$ [5].

Для каждого ВС при подлете к аэропорту известно оптимальное время посадки $T_i, i = \overline{1, P}$ — это время приземления при отсутствии других ВС. Важными величинами, как правило, влияющими на значение $F(X)$, являются размеры отклонения назначаемых времен приземлений x_i от оптимальных $d_i = x_i - T_i, i = \overline{1, P}$. Поэтому последовательность, в которой ВС упорядочены в соответствии с оптимальными временами T_i , служит в качестве исходной последовательности. Однако перестановки ВС в этой последовательности могут существенно изменить значение целевой функции, поскольку если поменять местами ВС разной категории турбулентности, то минимальные времена разделения между ними могут измениться, соответственно изменятся времена посадок этих и, возможно, последующих ВС.

Поскольку при фиксированной последовательности ВС минимальные времена разделения меж-

ду посадками ВС определены, задача о назначении времен посадок не требует использования целочисленных переменных и поэтому может быть эффективно решена с помощью стандартных пакетов линейного/квадратичного программирования. Полученное оптимальное значение целевой функции для данной фиксированной последовательности ВС позволяет в дальнейшем сравнивать ее с другими последовательностями и выбирать лучшую из них.

Предлагаемый эвристический алгоритм основан на последовательности шагов по перестановке близко стоящих в FCFS-последовательности ВС разных категорий турбулентности, если в результате такой перестановки никакие из ограничений не нарушаются и значение целевой функции уменьшается. Таким образом, предлагаемый алгоритм приводит к построению последовательности, которая не может быть хуже FCFS-последовательности.

На рис. 1 и 2 представлены примеры перестановок ВС в последовательности посадок, при которых уменьшается значение целевой функции

$\sum_{i=1}^P (T_i - x_i)^2$. Рассматриваются три категории турбулентности ВС, минимальные времена между приземлениями соответствуют табл. 1.

На рис. 1 и 2 отображены две временные оси с информацией о последовательности приземлений: кружками обозначены времена посадок, над кружками указаны номера ВС от 0 до 17. Над номером отображается значение $x_i - T_i$:

$$\begin{cases} x_i - T_i > 0 & \text{— назначенное время} \\ & \text{позже оптимального;} \\ x_i - T_i < 0 & \text{— назначенное время} \\ & \text{раньше оптимального;} \\ x_i = T_i & \text{— назначенное время приземления} \\ & \text{совпадает с оптимальным.} \end{cases}$$

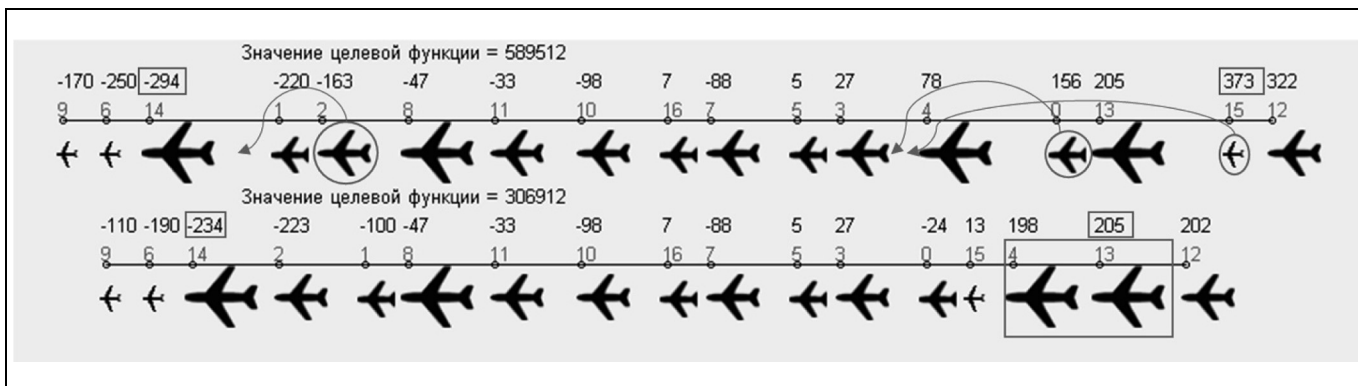


Рис. 2. Пример 2

Строкой выше представлено значение целевой функции.

Первая временная ось соответствует последовательности приземлений, при которой ВС упорядочены в соответствии с оптимальными временами посадок T_i FCFS-последовательности, вторая временная ось соответствует последовательности приземлений после некоторых, показанных на рис. 1 и 2, перестановок ВС.

На рис. 1:

$\sum_{i=1}^P (T_i - x_i)^2 = 122\,440$ для FCFS-последовательности;

$\sum_{i=1}^P (T_i - x_i)^2 = 89\,237$ для измененной последовательности.

На рис. 2:

$\sum_{i=1}^P (T_i - x_i)^2 = 589\,512$ для FCFS-последовательности;

$\sum_{i=1}^P (T_i - x_i)^2 = 306\,912$ для измененной последовательности.

3. АЛГОРИТМ ПОЛУЧЕНИЯ ПРИБЛИЖЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В алгоритме определяется оптимальное решение X для фиксированной последовательности ВС при помощи стандартного пакета оптимизации CPLEX.

Шаг 1. Рассмотреть в качестве исходной последовательности ВС FCFS-последовательность. Получить оптимальное решение и значение целевой функции для FCFS-последовательности F_1 . Если

оптимального решения не найдено, то завершить работу алгоритма.

Шаг 2. Присвоить $i = P$.

Шаг 3. Если $i > 0$, присвоить $i = i - 1$, в противном случае перейти к шагу 7. Присвоить $j = 1$.

Шаг 4. Если $C_{y_j} \neq C_{y_{j+1}}$, перейти к шагу 5, в противном случае перейти к шагу 6.

Шаг 5. В текущей последовательности $\{y_1, \dots, y_j, y_{j+1}, \dots, y_p\}$ поменять местами y_j и y_{j+1} и получить точное решение для новой последовательности $\{y_1, \dots, y_{j+1}, y_j, \dots, y_p\}$. Если точное решение существует и значение целевой функции F_2 для него таково, что $F_2 < F_1$, то последовательность $\{y_1, \dots, y_{j+1}, y_j, \dots, y_p\}$ сделать текущей и присвоить $F_1 = F_2$. В противном случае оставить текущую последовательность и значение F_1 без изменений.

Шаг 6. Если $j < P$, присвоить $j = j + 1$ и перейти к шагу 4, в противном случае перейти к шагу 3.

Шаг 7. Присвоить $i = P - 1$.

Шаг 8. Если $i > 0$, присвоить $i = i - 1$, в противном случае завершить работу алгоритма. Присвоить $j = 1$.

Шаг 9. Если $C_{y_j} \neq C_{y_{j+1}} \& C_{y_j} \neq C_{y_{j+2}} \& C_{y_{j+1}} \neq C_{y_{j+2}}$, перейти к шагу 10, в противном случае перейти к шагу 11.

Шаг 10. Из текущей последовательности $\{y_1, \dots, y_j, y_{j+1}, y_{j+2}, \dots, y_p\}$ получить две последовательности $\{y_1, \dots, y_{j+2}, y_j, y_{j+1}, \dots, y_p\}$ и $\{y_1, \dots, y_{j+1}, y_{j+2}, y_j, \dots, y_p\}$. Найти точные решения для новых последовательностей. Если точное решение последовательности $\{y_1, \dots, y_{j+2}, y_j, y_{j+1}, \dots, y_p\}$ существует и значение целевой функции F_2 для него таково, что $F_2 < F_1$, то последовательность $\{y_1, \dots, y_{j+2}, y_j, y_{j+1}, \dots, y_p\}$ сделать текущей и присвоить



$F_1 = F_2$. В противном случае оставить текущую последовательность и значение F_1 без изменений. Если точное решение последовательности $\{y_1, \dots, y_{j+1}, y_{j+2}, y_j, \dots, y_p\}$ существует и значение целевой функции для него F_3 таково, что $F_3 < F_1$, то последовательность $\{y_1, \dots, y_{j+1}, y_{j+2}, y_j, \dots, y_p\}$ сделать текущей и присвоить $F_1 = F_3$. В противном случае оставить текущую последовательность и значение F_1 без изменений.

Шаг 11. Если $j < P - 1$, присвоить $j = j + 1$ и перейти к шагу 9, в противном случае перейти к шагу 8.

Замечание. Если для FCFS-последовательности не существует решения, при котором выполняются заданные ограничения, это не всегда означает, что задача не имеет решения, но предлагаемый алгоритм в этом случае нужно скорректировать, поскольку процедура поиска оптимального решения даст отрицательный ответ. В этом случае для оценки последовательности ВС можно ввести следующую процедуру назначения времен посадок X .

Для ВС с номером y_1 назначить $x_1 = E_{y_1}$; для следующих ВС последовательно назначить

$$x_i = \min(L_{y_i}, \max(E_{y_i}, x_{i-1} + S_{c_i c_{i-1}})), \quad i = \overline{2, P}.$$

На основе полученных значений x_i рассчитывается значение целевой функции $F(X)$.

Поскольку при такой процедуре назначения времен посадок будут выполнены ограничения 1 и 2, но ограничения 3 — по соблюдению необходимых интервалов между ВС — могут не выполняться, то кроме целевой функции рассчитывается значение величины нарушения по формуле:

$$W(X) = \sum_{i=1}^P \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i, x_j > x_i}}^P \max(0, S_{c_i c_{j-1}} - (x_j - x_i)).$$

Эта величина $W(X) = 0$, если ограничения по соблюдению необходимых интервалов между ВС выполнены, в противном случае $W(X) > 0$.

Последовательности Y_1 и Y_2 , с соответствующими векторами времен посадок X_1 и X_2 , сравниваются таким образом:

- если $W(X_1) < W(X_2)$, то последовательность Y_1 лучше последовательности Y_2 ;
- если $W(X_1) = 0$ & $W(X_2) = 0$ & $F(X_1) < F(X_2)$, то последовательность Y_1 лучше последовательности Y_2 .

При применении алгоритма с предложенной процедурой сравнения последовательностей на некотором шаге может быть получено решение с нулевой величиной нарушения $W(X) = 0$, это решение может быть исходным для применения исходного алгоритма.

Предложенная процедура не гарантирует получение решения, поскольку решения без нарушения ограничений может вообще не существовать.

4. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для оценки качества предлагаемого алгоритма проводились вычислительные эксперименты.

Эффективность решения задачи зависит от интенсивности потока ВС. Для оценки интенсивности потока ВС введем следующие определения.

Определение 1. Если для FCFS-последовательности не существует решения, при котором выполняются заданные ограничения, то будем называть поток сверхинтенсивным. ♦

Как было отмечено выше, для сверхинтенсивного потока ВС решения задачи может не существовать.

Определение 2. Если для FCFS-последовательности Y существует оптимальное решение X и $\exists i \in \overline{1, P-1} : x[y_{i+1}] - x[y_i] > S_{c_{i+1}, c_i}$, то будем называть поток слабоинтенсивным. ♦

Очевидно, в этом случае вместо последовательности $Y = \{y_1, \dots, y_p\}$ целесообразно решать задачу для двух последовательностей меньшей длины: $\{y_1, \dots, y_i\}$ и $\{y_{i+1}, \dots, y_p\}$.

Определение 3. Если для FCFS-последовательности Y существует оптимальное решение X и выполняется условие $x[y_{i+1}] - x[y_i] = S_{c_{i+1}, c_i}$, $\forall i = \overline{1, P-1}$, то будем называть поток интенсивным. ♦

Эксперименты проводились для интенсивных потоков ВС.

Тесты генерировались случайным образом. Для каждого ВС генерировались величины:

$E_i = \text{rnd.Next}(t)$ — самое раннее возможное время приземления i -го ВС, $i = \overline{1, P}$, $\text{rnd.Next}(t)$ — случайное число в диапазоне $\overline{0, t}$; $t = 600$ с;

$L_i = E_i + \text{Time} + \text{rnd.Next}(t)$ — самое позднее возможное время приземления i -го ВС, $i = \overline{1, P}$, временное окно посадки имеет длину $\text{Time} + \text{rnd.Next}(t)$, параметр Time зависит от числа ВС P : $\text{Time} = (P - 1)120$ с $- t$ с;

$T_i = \text{rnd.Next}(E_i + \Delta t, L_i - \Delta t)$ — оптимальное время прибытия i -го ВС — случайное число в диапазоне $(\overline{E_i} + \Delta t, \overline{L_i} - \Delta t)$, где $\Delta t = 200$ с, $i = \overline{1, P}$;

$C_i = \text{rnd.Next}(3)$ — категория турбулентности i -го ВС, $i = \overline{1, P}$.

Минимальные временные интервалы между приземлениями ВС разных категорий турбулентности определяются в соответствии с табл. 1.

Для сгенерированного теста с помощью пакета CPLEX ищется оптимальное решение для FCFS-последовательности. Тесты, не удовлетворяющие определению интенсивных, не рассматриваются.

Эксперимент 1 предназначался для сравнения времени счета и качества решения, полученного с помощью эвристического алгоритма и точного решения, полученного с помощью стандартного пакета CPLEX.

Приведем результаты эксперимента для последовательности из 17-ти ВС. Время счета по предлагаемому алгоритму не превышало 1 с, на том же компьютере время расчета оптимального решения с помощью пакета CPLEX варьировалось от нескольких секунд до 7 ч 40 мин.

Эксперимент проводился с двумя представленными выше целевыми функциями.

Сравнивались оптимальные значения целевых функций для трех последовательностей ВС:

F_1 — для FCFS-последовательности, $i = \overline{1, P}$;

F_2 — для последовательности, полученной с помощью предлагаемого алгоритма;

F_3 — для оптимального решения, рассчитанного с помощью пакета CPLEX.

Значение минимизируемой целевой функции уменьшается по сравнению со значением целевой функции для исходного решения на величину $F_1 - F_3$ при оптимальном решении, на величину $F_1 - F_2$ при применении предлагаемого алгоритма.

В серии из 500 тестов оценивалась эффективность решения — среднее значение отношения

$$\frac{F_1 - F_2}{F_1 - F_3} 100\%,$$

которое характеризует среднее уменьшение значения целевой функции при применении предлагаемого алгоритма по сравнению с максимально возможным (100%) уменьшением значения целевой функции при оптимальном решении. Кроме этого, оценивалась доля тестов, в которых при применении алгоритма было получено оптимальное решение. Сравнивался средний размер максимального сдвига p , полученного при решении задачи с по-

мощью предлагаемого алгоритма и с помощью пакета CPLEX.

Результаты представлены в табл. 2.

Эксперимент 2 предназначался для определения времени счета и качества решения, полученного с помощью эвристического алгоритма для последовательности из 40 ВС.

Тесты генерировались аналогично первому эксперименту.

Для этого случая с помощью стандартного пакета CPLEX решение получить не удастся из-за ограниченности вычислительных ресурсов. Для оценки эффективности алгоритма в серии из 500 тестов оценивалось среднее значение отношения

$$\frac{F_1 - F_2}{F_1} 100\%,$$

которое определяет, на сколько процентов в среднем меньше значение целевой функции F_2 для последовательности, полученной с помощью предлагаемого алгоритма, по сравнению со значением целевой функции F_1 — для FCFS-последовательности.

Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 2

Эффективность решения при разных целевых функциях

Целевая функция	$\frac{F_1 - F_2}{F_1 - F_3} \times 100\%$	Доля оптимальных решений, %	Средний сдвиг p (предлагаемый алгоритм)	Средний сдвиг p (CPLEX)
$\sum_{i=1}^P (T_i - x_i) $	~78,7	~30,2	~2,04	~3,36
$\sum_{i=1}^P (T_i - x_i)^2$	~82,7	~51,8	~1,65	~2,01

Таблица 3

Эффективность решения при разных целевых функциях

Целевая функция	$\frac{F_1 - F_2}{F_1} 100\%$	Средний сдвиг p
$\sum_{i=1}^P (T_i - x_i) $	~28,33	~2
$\sum_{i=1}^P (T_i - x_i)^2$	~37,77	~2



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа — первый шаг на пути разработки алгоритмов повышения эффективности использования взлетно-посадочных полос (ВПП) аэропортов. Помимо оптимизации очередей воздушных судов (ВС) на посадку необходимо применять алгоритмы расчетов траекторий и скоростей движения ВС для безопасного перестроения ВС с целью выдерживания оптимальной последовательности посадок. За рамками данной статьи остались задача оптимизации приземлений на несколько ВПП и задача, когда одна ВПП применяется и для взлетов, и для приземлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вересников Г.С., Егоров Н.А., Кулида Е.Л., Лебедев В.Г. Методы построения оптимальных очередей воздушных судов на посадку. Ч. 1. Методы точного решения // Проблемы управления. — 2018. — № 4. — С. 2—13. [Veresnikov, G.S., Egorov, N.A., Kulida, E.L., Lebedev, V.G. Methods for solving of the aircraft landing problem. Part 1. Exact solution methods // Control Sciences. — 2018. — No. 4. — P. 2—13. (In Russian)]
2. Вересников Г.С., Егоров Н.А., Кулида Е.Л., Лебедев В.Г. Методы построения оптимальных очередей воздушных судов на посадку. Ч. 2. Методы приближенного решения // Проблемы управления. — 2018. — № 5. — С. 2—13. [Veresnikov, G.S., Egorov, N.A., Kulida, E.L., Lebedev, V.G. Methods for solving of the aircraft landing problem. Part 2. Approximate solution methods // Control Sciences. — 2018. — No. 5. — P. 2—13. (In Russian)]

3. Bennell, J.A., Mesgarpour, M., Potts, C.N. Dynamic scheduling of aircraft landings // European Journal of Operational Research. — 2017. — No. 258. — P. 315—327.
4. Beasley, J.E., Krishnamoorthy, M., Sharaiha, Y.M., and Abramson, D. Scheduling aircraft landings — the static case // Transportation Science. — 2000. — Vol. 34, No. 2. — P. 180—197.
5. Kulida, E.L., Lebedev, V.G., Egorov, N.A. The heuristic algorithm for planes queue optimization // Proceedings of the 11th International Conference «Management of Large-Scale System Development» (MLSD). — M.: IEEE, 2018. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8551908>.
6. Кулида Е.Л., Егоров Н.А., Лебедев В.Г. Формирование оптимальных очередей воздушных судов на прилет // Материалы 11-й междунар. конф. «Управление развитием крупномасштабных систем» MLSD'2018 / ИПУ РАН. — М., 2018. — Т. 2. — С. 296—297. [Kulida, E.L., Egorov, N.A., Lebedev, V.G. Formirovanie optimal'nykh ocheredei vozdushnykh sudov na prilet // Materialy 11-i mezhduunar. konf. «Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem» MLSD'2018 / IPU RAN. — Moscow, 2018. — T. 2. — S. 296—297. (In Russian)]

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Лазаревым.

Поступила в редакцию 5.03.2019, после доработки 5.07.2019.
Принята к публикации 30.07.2019.

Кулида Елена Львовна — канд. техн. наук, ✉ lenak@ipu.ru,

Лебедев Валентин Григорьевич — д-р техн. наук,
✉ lebedev@ipu.ru,

Егоров Николай Александрович — канд. техн. наук,
✉ egorov@ipu.ru,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва.

STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF THE ALGORITHM TO OPTIMIZE THE FLOW OF AIRCRAFT ON LANDING

E.L. Kulida[#], V.G. Lebedev, N.A. Egorov

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[#] ✉ lenak@ipu.ru

Abstract. The problem of aircraft landing sequence optimization is considered. The formal statement of the problem is presented of forming the optimal aircraft queue for landing, the main limitations and target functions. In order to obtain the solution in real time, the methods of optimization of the initial sequence are illustrated and the heuristic algorithm of the approximate solution of the problem is proposed. As the initial sequence for the algorithm to operate, the sequence is selected in that the aircraft land in the order of the arrival. In the process of applying the algorithm, the initial solution corresponding to the initial sequence cannot be worsened. Computational experiments are carried out in order to study the efficiency of the algorithm proposed. The calculating time and the quality are compared of the initial solution, the heuristic solution obtained using the proposed heuristic algorithm, and the optimal solution obtained using the standard CPLEX package. Noted is that for the problem of large dimension (with large number of aircraft) the optimal solution cannot be obtained, so the heuristic solution is compared with the initial one. Tests for intense aircraft flows are generated randomly. The proposed algorithm allows within a reasonable time either to obtain optimal (30—52 % of cases) solutions of the problem or to significantly improve the initial solution.

Keywords: aircraft sequences, objective function, optimal solution, heuristic algorithm, computational experiment.

Funding. The work is performed with financial support of Russian Foundation of Basic Research (grant No. 18-08-00822a) and I30 program of Presidium of Russian Academy of Sciences.



XIII ВСЕРОССИЙСКОЕ СОВЕЩАНИЕ ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ (ВСПУ—2019)

Москва, ИПУ РАН, 17—20 июня 2019 г.

XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ—2019, Совещание) было организовано и проведено Институтом проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН) при информационной поддержке Российской академии наук, Министерства науки и высшего образования России, Российского национального комитета по автоматическому управлению, Академии навигации и управления движением, Научного совета РАН по теории и процессам управления, Научного совета РАН по робототехнике и мехатронике и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-08-20024.

Совещание проводилось в целях:

- ознакомления участников с последними достижениями науки и практики управления по разным направлениям исследований и практических разработок;
- выявления основных тенденций и связей между различными направлениями науки управления, обсуждения сценарных прогнозов их развития;
- выявления в процессе дискуссий проблем и наиболее перспективных направлений теории управления;
- содействия упрочению связей между представителями различных академических и отраслевых научных центров, вузовской науки и реального сектора экономики;
- обсуждения проблемы образования в области управления и задач, которые ставит перед теорией управления современная практика.

Традиция проведения совещаний по проблемам управления существовала еще в советское время, когда, начиная с 1940 г., было проведено 11 совещаний. В новейшей истории Совещание проводилось во второй раз (после XII Всероссийского со-

вещания по проблемам управления, Москва, ИПУ РАН, 16—19 июня 2014 г., <http://vspu2014.ipu.ru/>) и было приурочено к 80-летию юбилею ИПУ РАН.

Совещание собрало 799 участников, в числе которых 19 из Армении, Белоруссии, Вьетнама, Германии, Египта, Киргизии, Мексики, Польши, США, Украины и Франции.

На Совещание были приглашены 22 пленарных доклада, подано 759 секционных докладов, из них включено в Программу 718, заслушано 638. Проведено 5 пленарных заседаний и 71 секционное заседание, в том числе 4 приглашенные сессии. Организовано два круглых стола.

На сайте Совещания <https://vspu2019.ipu.ru/> в разделе «Труды» <https://vspu2019.ipu.ru/prcdngs> опубликована онлайн-версия трудов Совещания, в которую вошли материалы состоявшихся в ходе Совещания докладов. В ходе совещания велась видеозапись пленарных докладов, с ней можно ознакомиться на youtube-канале ИПУ РАН по адресу <https://www.youtube.com/watch?v=RCachGnxqis&list=PL6VRZz38PrqOZV3EUjEYJpATZiX4yUMZb>.

Научная программа Совещания составлена таким образом, чтобы максимально широко охватить отрасли науки и практики, связанные с теорией управления и ее применением. Научная программа включала в себя направления:

- теория систем управления;
- управление подвижными объектами и навигация;
- интеллектуальные системы в управлении;
- управление в промышленности и логистике;
- управление системами междисциплинарной природы;
- средства измерения, вычислений и контроля в управлении;



- системный анализ и принятие решений в задачах управления;
- информационные технологии в управлении;
- проблемы образования в области управления: современное содержание и технологии обучения.

На общем пленарном заседании заслушано шесть докладов:

М.В. Губко (ИПУ РАН). Задачи управления структурой сложных систем;

Е.А. Микрин (РКК «Энергия»). Опыт и перспективы создания бортовых комплексов управления космических аппаратов;

А.С. Позняк (CINVESTAV-IPN, Mexico). Управление динамическими системами с неопределенной моделью: метод скользящих режимов и дифференциальные нейронные сети;

В.Г. Пешехонов (АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»). Перспективы гироскопии;

А.Л. Фрадков (ИПМаш РАН). Киберфизические системы: идеи и перспективы;

Э. Фридман (Университет Тель-Авива, Израиль). Цифровые и сетевые системы управления: подход на основе моделей с запаздыванием.

По ходу обработки поступивших заявок на участие в Совещании Программный комитет ВСПУ—2019 принял решение организовать три укрупненных потока направлений, объединяющих тематически близкие направления.

Поток направлений 1 «Теория систем управления», «Управление подвижными системами и навигация» тематически стоит наиболее близко к традиционной («классической») теории управления, с обсуждением характерных для нее математических методов и объектов (линейные и нелинейные системы, стохастические модели, механические системы, подвижные объекты и др.). Данный поток направлений собрал наибольшее число поданных докладов и участников Совещания (примерно половина от общего числа, что свидетельствует об интересе участников Совещания к выбранной тематике). В рамках данного потока направлений были проведены два пленарных заседания и 32 секционных заседания.

На пленарных заседаниях были затронуты вопросы:

- стабилизация управляемой системы за конечное время (*И.М. Ананьевский, А.И. Овсеевич, ИПМех РАН*);

- градиентные методы в невыпуклой оптимизации (*М.В. Балашов, ИПУ РАН*);

- адаптивные наблюдатели переменных состояния нелинейных систем: новые идеи и методики (*А.А. Бобцов, Университет ИТМО*);

- планирование оптимальных маршрутов движения управляемых объектов в конфликтной среде (*А.А. Галяев, ИПУ РАН*);

- модели, системы и технологии подводных роботов и их применение для решения поисково-обследовательских задач (*Л.В. Киселев, А.В. Инзарцев, В.В. Костенко, А.М. Павин, ИПМТ ДВО РАН*);

- метод S -переменной для робастного анализа (*Д. Посель, LAAS-CNRS, Франция*);

- об уравнениях скольжения в разрывных системах (*В.И. Уткин, Университет штата Огайо, США*);

- спектральные методы оценки устойчивости и управления в электроэнергетических системах (*И.Б. Ядыкин, А.Б. Искаков, ИПУ РАН*).

Доклады на секционные заседания данного потока направлений были сгруппированы по общности рассматриваемых методов или изучаемых объектов управления. Состоялись заседания, посвященные (в скобках указано число заседаний): линейным системам (1); нелинейным системам (3); дискретным системам (1); системам с запаздыванием (1); стохастическим системам (2); киберфизическим системам и игровым задачам (1); распределенным системам (1); оптимальному управлению (2); оптимизации (2); геометрическим методам в управлении (2); адаптивному и робастному управлению (2); задачам и методам идентификации (3); сетевому управлению (1); мехатронике и управлению в робототехнических системах (3); управлению в авиации и космонавтике (3); управлению морскими подвижными объектами (1); управлению автотранспортом и автотрафиком (1); навигации (2).

Среди обсуждавшихся задач наряду с классическими (задачи теории устойчивости, теории колебаний, адаптивных и робастных систем, идентификации и др.) отметим и такие, как задачи управления в робототехнических системах, задачи сетевого управления, задачи навигации. Так, одна из приглашенных сессий была посвящена рассмотрению задач сетевого управления и управления в случайных графах (организатор — *Н.М. Маркович, ИПУ РАН*). Практическая потребность в рассмотрении задач сетевого управления исходит из постановок прикладных задач в логистических системах, задач управления маршрутизацией больших информационных потоков, задач группового управления, управления в многоагентных системах и др.

В рамках данного потока направлений состоялась также приглашенная сессия «Состояние и перспективы развития современных систем навигации» (организаторы — *В.Г. Пешехонов, О.А. Степанов, ЦНИИ «Электроприбор»*, см. Приложение 1), в рамках которой обсуждались различные аспекты современных навигационных систем от технических средств до программного обеспечения навигационных приборов. На одном из заседаний по нелинейным системам состоялась приглашен-

ная сессия, посвященная памяти чл.-корр. РАН Г.А. Леонова (организаторы *А.Л. Фрадков* и *Н.В. Кузнецов*, СПбГУ). В прочитанных докладах рассказывалось о современном состоянии ветви теории колебаний, основоположником которой был Г.А. Леонов. Еще одна приглашенная сессия, посвященная развитию современного понятия «киберфизические системы» (организаторы *А.Л. Фрадков*, СПбГУ, и *А.А. Бобцов*, ИТМО), поднимала различные вопросы, в том числе вопросы промышленных кибернетических систем, кибернетической физики, проблему C^3 и др.

Актуальным задачам в современной робототехнике был посвящен круглый стол «Перспективные технологии и методы управления в робототехнике» (организаторы *И.Л. Ермолов*, ИПМех РАН и *Р.В. Мещеряков*, ИПУ РАН. Вопросы, обсуждавшиеся на круглом столе: «Фундаментальные проблемы управления автономными робототехническими комплексами»; «Прикладные задачи создания автономных робототехнических комплексов и их группировок».

Поток направлений 2 «Интеллектуальные системы в управлении», «Управление системами междисциплинарной природы», «Системный анализ и принятие решений», «Проблемы образования в области управления».

В рамках данного потока состоялись одно пленарное заседание и 22 секционных заседания.

На пленарном заседании обсуждались:

- суперкомпьютерные технологии в моделировании социально-экономических систем (*А.Р. Бахтизин*, ЦЭМИ РАН);
- поведенческая парадигма искусственного интеллекта, групповое управление и самоорганизующиеся сети агентов (*В.И. Городецкий*, InfoWings);
- проблемы совершенствования системы управления научными исследованиями в контексте стратегии развития России (*В.В. Иванов*, РАН);
- управление научно-технологическим развитием энергетики (*С.П. Филиппов*, ИНЭИ РАН).

Распределение заседаний по тематикам обсуждений (в скобках указано число заседаний): анализ данных, экспертные оценки, управление безопасностью сложных систем (1); управление медико-биологическими системами (1); философия и методология управления (2); управление эколого-экономическими системами (1); эргатические системы в управлении, человеко-машинный интерфейс (1); системный анализ (1); машинное обучение и нейросетевые методы (1); сетевые и многоагентные модели (1); управление социально-экономическими системами (4); теория игр, теория выбора (2); интеллектуальная поддержка принятия решений, интеллектуальный анализ данных (2); управление развитием крупномасштабных систем (1); управление организационными структурами, про-

ектами и программами, управление политическими и социальными системами (1); проблемы образования в области управления (1).

В рамках данного потока состоялась очередная конференция «Друкерские чтения» (организатор — *Р.М. Нижегородцев*, ИПУ РАН), на которой обсуждались вопросы управления в экономических системах, в частности, вопросы управления инновационным развитием на региональном и федеральном уровнях, другие фундаментальные и прикладные задачи экономической теории (2 заседания, 32 доклада).

Поток направлений 3 «Управление в промышленности и логистике», «Средства измерения, вычислений и контроля в управлении», «Информационные технологии в управлении».

В рамках данного потока состоялось одно пленарное заседание и 17 секционных заседаний.

Вопросы, обсуждавшиеся на пленарных заседаниях:

- математические методы проектирования и опыт реализации привязных высотных беспилотных телекоммуникационных платформ (*В.М. Вишневский*, ИПУ РАН);
- робототехника в современном цифровом производстве: состояние и перспективы (*С.С. Гаврюшин*, МГТУ им. Н.Э. Баумана);
- стохастические модели в задачах оптимизации технологий виртуализации и управления ресурсами в беспроводных мультисервисных сетях (*К.Е. Самуйлов*, РУДН);
- управление производством: новая реальность, «другая» наука, передовое образование (*Л.Р. Соркин*, *В.М. Дозорцев*, АО «Хоневелл», *А.А. Менн*).

Секционные заседания потока направлений (в скобках указано число заседаний): имитационное моделирование, мультиагентные системы (1); технические средства измерения, преобразования и контроля в управлении (2); цифровые средства и системы управления (1); управление предприятиями и жизненным циклом (1); управление в энергетике (1); автоматизированное проектирование (1); проблемы информационной и кибербезопасности в управлении (2); вычислительные системы и сетевые технологии в управлении (3); управление технологическими процессами (3); надежность, отказоустойчивость, техническая диагностика (1); управление транспортно-логистическими системами (1).

В рамках Совещания также состоялся круглый стол «Как подготовить доклад на авторитетную конференцию или статью в высокорейтинговый журнал» (Организаторы — *А.Л. Фрадков* (СПбГУ) и *О.А. Степанов* (ЦНИИ «Электроприбор»). Подробное описание круглого стола см. в Приложении 2.



ПРИЛОЖЕНИЕ 1

**О приглашенной секции
«Состояние и перспективы развития
современных систем навигации»
(составитель — О.А. Степанов)**

Идея провести приглашенную секцию «Состояние и перспективы развития современных систем навигации» в рамках XIII Всероссийского совещания по проблемам управления принадлежала генеральному директору АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор»» (г. Санкт-Петербург), академику РАН *В.Г. Пешехонову*, который, кроме всего прочего, является президентом активно работающей международной общественной организации «Навигация и управление движением», в состав которой входят авторитетные российские и зарубежные ученые, занимающиеся разработкой навигационных систем. В результате была сформирована программа, включающая в себя девять докладов, посвященных актуальным вопросам теории и практики построения систем навигации.

Один из докладов, заявленный в рамках приглашенной секции «Перспективы гироскопии», был представлен самим *В.Г. Пешехоновым* во время пленарного заседания. Доклад касался состояния дел в области разработки чувствительных элементов (гироскопов), определяющих точность автономных систем навигации, предназначенных для подвижных объектов различных классов. В докладе были проанализированы современное состояние и перспективы развития основных видов гироскопов, отмечены работы по созданию гироскопов новых типов на эффектах квантовой оптики — ядерно-магнитном резонансе и волнах материи. Кроме того, были обсуждены перспективы применения таких гироскопов.

Остальные доклады, касающиеся широкого круга вопросов, связанных с созданием современных систем навигации, были заслушаны уже на специальном заседании, состоявшемся 20 июня.

Это заседание открылось докладом «Состояние и развитие спутниковых навигационных систем», подготовленным ведущими специалистами АО «Информационные спутниковые системы» имени академика *М.Ф. Решетнева* (г. Железнодорожный, Красноярский край) *С.Г. Ревнивых* и *В.Е. Косенко*. В докладе был представлен краткий обзор характеристик четырех действующих глобальных спутниковых навигационных систем: GPS (США), ГЛОНАСС (Россия), Galileo (Евросоюз), BeiDou (Китай) и проанализированы основные тенденции их развития.

В докладе «е-Навигация на марше» представителя АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор»» *Б.С. Ривкина* речь шла о концепции е-Навигации, которую можно определить как комплекс процедур, направленных на совершенствование процесса плавания от причала к причалу с целью повышения надежности и безопасности судовождения. В докладе кратко изложена история формирования концепции, основные ее положения и приведены результаты исследований, проводимых для продвижения идей е-Навигации в практику судовождения.

Следующий доклад «Высокоточные волоконно-оптические гироскопы. Современное состояние и перспективы» от группы авторов из АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор»» представил *А.А. Унтилов*. В докладе были описаны высокоточные волоконно-оптические гироскопы (ВОГ), производимые в ЦНИИ «Электроприбор», рассмотрены их конструкции и характеристики. Кроме того, были приведены результаты испытаний на долговременную стабильность и обсуждены области возможного применения и направления дальнейшего развития ВОГ.

В докладе *Б.П. Бодунова* из АО «Научно-производственное предприятие «МЕДИКОН»», (г. Миасс, Челябинская обл.) и *С.Е. Перелева* из Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (г. Москва) был описан волновой твердотельный гироскоп, разработанный российскими учеными и предназначенный для низкодинамичных и высокодинамичных объектов. Были представлены результаты испытаний нового инерциального датчика на его основе и обсуждены перспективы его применения.

Пути решения проблемы определения уклонений отвесной линии (УОЛ) как источника методических ошибок инерциальных навигационных систем были обсуждены в докладе, представленном *А.А. Красновым* от группы специалистов из ЦНИИ «Электроприбор». В нем были кратко рассмотрены гравиметрический, астрономо-геодезический и инерциально-геодезический методы определения УОЛ и обсуждены перспективы комплексного применения этих методов с целью повышения точности решения задачи инерциальной навигации.

Важные вопросы методики проведения калибровки чувствительных элементов, применяемых для построения инерциальных систем, обсуждались в докладе *А.В. Козлова*, представившего результаты разработки такой методики группой известных специалистов из лаборатории управления и навигации МГУ им. М.В. Ломоносова. Были отмечены основные достоинства методики, связанные с возможностью калибровки на грубых одноосных стендах, отсутствием жестких требований к плану выполняемых при этом операций, их последовательности и параметрам движения, а также с применением единого алгоритма обработки калмановского типа.

После перерыва были заслушаны еще два запланированных доклада. Один из них — «Интегрированные навигационно-посадочные комплексы БПЛА с функцией обнаружения отказов» от группы ученых из Московского авиационного института — представил *К.К. Веремеенко*. Он сообщил о результатах разработок навигационных комплексов малогабаритных БПЛА, информационным ядром которых служит бесплатформенная инерциальная навигационная система, корректируемая на различных этапах полета по данным различных бортовых и наземных средств. Как отметил докладчик, рассматриваемые комплексы позволяют обеспечивать информационную поддержку управления БПЛА на всех этапах полета от взлета до посадки.

И наконец, в докладе *А.В. Моторина* и *О.А. Степанова* (ЦНИИ «Электроприбор» и Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург) были рассмотрены методы адаптив-

ного оценивания, обеспечивающие эффективное решение задач обработки избыточной измерительной информации в условиях неопределенностей моделей сигналов и ошибок измерения применительно к навигационным приложениям.

После завершения всех запланированных докладов по просьбе авторов был заслушан еще один доклад от ИПУ РАН, который был представлен *М.Ю. Тхоренко* и касался вопросов обработки геофизических данных для обеспечения работы навигационной системы, корректируемой по градиентам магнитного поля Земли.

По окончании заседания состоялась дискуссия, касающаяся как вопросов, затронутых в докладах, так и целесообразности организации подобного рода тематических заседаний в рамках Всероссийского совещания по управлению.

В целом участники поддержали идею проведения такого рода заседаний, и при этом было высказано предложение на основе прослушанных докладов выпустить короткий видеокурс, который мог бы быть полезным не только для обучения студентов старших курсов и аспирантов, но и для разработчиков современных навигационных систем.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

**О круглом столе:
«Как подготовить доклад
на авторитетную конференцию
или статью в высокорейтинговый журнал».**

**Организаторы: О.А. Степанов
(АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор»»,
Университет ИТМО), А.Л. Фрадков (ИПМаш РАН).
Составитель — А.Л. Фрадков**

Идея организовать обсуждение вопросов, связанных с подготовкой докладов на авторитетные международные конференции, возникла после завершения юбилейного 20-го Всемирного конгресса по автоматическому управлению, который проходил в 2017 г. в Тулузе. Как обычно, на заключительном заседании при подведении итогов приводились данные о количестве заявленных и принятых докладов от каждой страны. При их обсуждении организаторами круглого стола было отмечено два обстоятельства: во-первых, достаточно большое число (по сравнению с предыдущими конгрессами) докладов, поданных от России (152 доклада, против примерно 50 и 100 докладов на двух предыдущих конгрессах (г. Кейптаун, 2014 г. и г. Милан, 2011 г.)), а во-вторых — значительная (более 40 %) доля непринятых докладов. Первое обстоятельство можно было расценивать как положительное, поскольку из этих цифр следует возросший интерес в России к важному научному мероприятию, а второе — несомненно, как отрицательное, иллюстрирующее, в том числе и факт неумения части авторов из России представить свои результаты на должном уровне. В связи с отмеченными обстоятельствами возникла идея проведения семинара для широкого круга участников,

на котором смогли бы выступить ведущие ученые, имеющие значительный опыт подготовки научных докладов для авторитетных научных конференций и статей для высокорейтинговых журналов. Всероссийское совещание по автоматическому управлению, проходящее накануне следующего Всемирного конгресса, который состоится в 2020 г. в Германии, представлялось отличной площадкой для реализации этой идеи.

Для выступления на круглом столе были приглашены известные ученые *Дмитрий Посель* (Франция — homepages.laas.fr/peaucell) и *Михаил Басин* (Мексика, Россия — <http://www.fcfm.uanl.mx/Posgrado/Investigador/MikhailBasin>).

Выбор Д. Поселя (Laboratory for Analysis and Architecture of Systems (LAAS) research center of the National Center for Scientific Research (CNRS) in Toulouse, France) определялся в том числе и тем обстоятельством, что он возглавлял национальный организационный комитет 20-го Всемирного конгресса по управлению в г. Тулузе (General Chair of the 20th IFAC World Congress) и был соавтором итогового отчета о его проведении (<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01851729>). Кроме того, он активно сотрудничает со многими учеными из России, включая представителей ИПУ РАН.

Приглашение М. Басина (School of Physical and Mathematical Sciences, Autonomous University of Nuevo Leon, Mexico) было обусловлено, в частности тем, что он имеет значительный опыт работы в составе редакционных коллегий авторитетных научных журналов. Достаточно сказать, что с 2010 г. он является одним из трех главных редакторов одного из старейших в США журналов «Journal of the Franklin Institute» (JFI) и ассоциированным редактором одного из самых престижных журналов в области теории управления — «Automatica». Он также активно сотрудничает с российскими учеными, в рамках международной научной лаборатории «Интегрированные системы ориентации и навигации» при университете ИТМО (г. Санкт-Петербург). И Д. Посель, и М. Басин любезно согласились приехать на ВСПУ и выступить на запланированном круглом столе.

Кроме того, на круглом столе выступил представитель России — известный ученый из г. Санкт-Петербурга *Александр Львович Фрадков*, один из трех российских IFAC Fellows, имеющий громадный опыт организации и участия в различного рода международных конференциях и активно публикующийся в авторитетных научных журналах.

Открыл круглый стол *О.А. Степанов* (АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор»», Университет ИТМО). Он коротко изложил мотивацию организаторов и представил основные докладчиков.

Первым выступил *Д. Посель*, который рассказал о работе, связанной с организацией Всемирного конгресса, и высказал некоторые полезные рекомендации. Он привел сравнительные цифры, характеризующие активность ученых из разных стран в 20-м Конгрессе и в частности отметил, что доклады из России отличаются тем, что среди них большое количество индивидуальных докладов или докладов с малым числом соавторов. Среднее число соавторов в заявленных статьях составило 2,3.



На первом месте по этому показателю оказалась Испания, у которой число соавторов равнялось 3,8. Был также отмечен низкий уровень сотрудничества с учеными из других стран при подготовке статей российскими авторами, что проявилось в малом количестве совместно подготовленных докладов. Д. Посель обратил внимание на тот факт, что многие достойные результаты, опубликованные в русской научной литературе, не известны или не оценены должным образом в англоязычной литературе. Он посоветовал российским ученым чаще представлять и цитировать эти результаты.

В своем выступлении М. Басин поделился опытом работы в редакциях различных журналов. Он остановился на основных критериях, определяющих уровень публикации, отметил необходимость тщательной подготовки введения, заключения и библиографического списка, обсудил особенность взаимодействия между авторами, рецензентами и редакторами при рецензировании статьи, а также сроки прохождения статей в различных журналах. Он привел интересную статистику, иллюстрирующую участие ученых из разных стран при подготовке статей для журнала JFI. Из 1692 документов, представленных в JFI в 2018 г.: 976 из Китая; 143 из Индии; 105 из Ирана; 30 из США и всего 4 из России (2 принято, один отклонен и один еще в процессе выступления). В заключение М. Басин призвал российских авторов активнее подавать свои публикации в авторитетные журналы.

Последним выступил А.Л. Фрадков. Он напомнил о своей статье «Как опубликовать хорошую статью и отклонить плохую. Заметки рецензента», опубликованной еще в 2003 г. в журнале «Автоматика и телемеханика» http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=at&paperid=1965&option_lang=rus) и напрямую связанной с темой круглого стола. В докладе были изложены некоторые рекомендации о том, как пробиться на мировой научный рынок и добиться публикации хорошей статьи. Докладчик обратил внимание на то, что в современных условиях количество и качество научных публикаций приобретает особую актуальность, поскольку

ку этот показатель немаловажен при подведении итогов различных конкурсов по выделению научных грантов. И здесь важно не забывать о репутации ученого, публиковать только действительно качественные результаты, не гнаться за количеством статей, противостоять соблазнам. К сожалению, как отметил докладчик, в России в этой области не все в порядке, поскольку наша страна занимает одно из лидирующих мест в мире в производстве так называемого научного мусора.

Поднятые в докладах темы вызвали живой интерес у присутствующих. Было много выступающих, обсуждались проблемы не только поднятые докладчиками, но и другие вопросы, связанные, в частности, с публикациями в онлайн журналах, платными публикациями, организацией баз данных рецензентов и многие другие. Несмотря на довольно позднее время начала круглого стола (который начался уже после закрытия конференции в восьмом часу вечера), на нем присутствовало более 50 чел., и он продлился почти два часа, закончившись уже в десятом часу вечера.

Подчеркнем, что все материалы круглого стола выложены на сайте ВСПУ https://www.youtube.com/watch?v=L_yeA7HhRsI&list=PL6VRZz38PrqOZV3EUjEYJpATZiX4yUMZb&index=24 в открытом доступе, за что отдельная благодарность организаторам Совещания. Это дает возможность всем желающим ознакомиться с докладами, вопросами и прошедшей дискуссией. Очень хочется надеяться, что эти материалы будут востребованы и окажутся полезными многим российским ученым, особенно начинающим свою деятельность на международном уровне, и ближайшие результаты будут заметны уже на предстоящем Всемирном конгрессе по автоматическому управлению в Берлине.

*Заместитель председателя Оргкомитета
И.Н. Барабанов*

Барабанов Иван Николаевич — канд. физ.-мат. наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ ivbar@ipu.ru.

XIII ALL-RUSSIA CONTROL CONFERENCE (VSPU—2019)

I.N. Barabanov

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
✉ ivbar@ipu.ru

Abstract. Overall results of the conference, which took place on June 17—20 in the V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, are presented. The technical program of the conference, as well as brief statistical information, is given. Some interesting results discussed during plenary and section sessions are named. Plenary speakers described the state-of-the-art of modern control science and outlined future directions. Organizers of the invited sessions and round tables in the frame of the conference represented the results of the events. The links to the online version of the Conference Proceedings and to the recorded video of plenary talks are presented.

Keywords: conference, control science, technical program, proceedings.

Владимир Николаевич БУРКОВ (к 80-летию со дня рождения)

17 ноября 2019 года исполнилось 80 лет известному ученому в области управления большими системами, создателю теории активных систем, лауреату Государственной премии СССР, премии Совета Министров СССР, премии Дж. фон Неймана, заслуженному деятелю науки Российской Федерации, академику Российской академии естественных наук, доктору технических наук, профессору Владимиру Николаевичу Буркову.

Путь в науку для Владимира Николаевича начался в Московском физико-техническом институте, куда он поступил после окончания школы, получил диплом МФТИ в 1963 году и остался там же в аспирантуре. В 1966 году — защита кандидатской диссертации и работа в Институте автоматизации и телемеханики (ныне Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН) под руководством А.Я. Лернера, в лаборатории, которая впоследствии перешла под руководство В.Н. Буркова и стала лабораторией активных систем. Долгие годы Владимир Николаевич был бессменным заведующим лабораторией, сумев создать вокруг себя сильный и сплоченный коллектив.

Ровно 50 лет назад — в 1969 году, во время стажировки в Париже (в Обществе экономики и прикладной математики), у В.Н. Буркова возникла идея теории активных систем, основоположником которой он является. В рамках этой теории еще в Советском Союзе были разработаны и применены на практике уникальные механизмы согласованного управления, распределения ресурсов, комплексного оценивания сложных систем различного уровня, противозатратного налогообложения и многие другие. И сейчас теория дает интересные и значимые результаты. Изменение экономического курса России с плановой экономики на рыночную привело к созданию технологий реформирования и реструктуризации предприятий и корпораций, управления развитием регионов и механизмов обеспечения экологической безопасности.

Теория активных систем с самого начала накапливала и продолжает накапливать интересные и значимые фундаментальные результаты. Традиция проведения школ и научных конференций по активным системам и управлению большими системами, ко-



торая зародилась еще в СССР, сохраняется до сих пор, а интерес к периодически проводящимся конференциям не ослабевает. Они собирали и продолжают собирать ученых-единомышленников из разных городов и стран, оставаясь базой для обмена новыми результатами и достижениями.

Более 25 учеников В.Н. Буркова защитили докторские диссертации, более 100 стали кандидатами наук. Один из его учеников — Д.А. Новиков, в свое время самый молодой доктор в Институте, из-

бран членом-корреспондентом РАН и уже не первый год руководит Институтом проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН.

Начало XXI века привело к новому повороту в научной биографии В.Н. Буркова. Совместно с дочерью, Ириной Бурковой, им был разработан метод решения задач нелинейной оптимизации — метод сетевого программирования, который позволил на единой основе получить новые алгоритмы решения целого ряда задач оптимизации. Этот метод уже введен в программы некоторых вузов, на его основе продолжают ставиться и решаться задачи — как самим В.Н. Бурковым, так и его учениками, недостатка которых у Владимира Николаевича никогда не было и, конечно, не будет. Ведь многие из них остаются не только коллегами, но и друзьями, они продолжают считать В.Н. Буркова своим учителем во всех отношениях — и в беззаветной преданности науке, и в необыкновенной порядочности по отношению к людям, и в любви к своей семье, и в хранении традиций и уважении к ним, и в умении быть увлеченным человеком, воспринимающим жизнь во всем многообразии ее проявлений.

В.Н. Бурков известен и уважаем во многих научных коллективах нашей страны и многих стран мира — Австрии, Великобритании, США, Германии, Японии, Турции, Франции, Польше, Болгарии, Венгрии... Впрочем, все перечислить сложно.

Преданный лучшим традициям Института проблем управления (ИАТа), Владимир Николаевич продолжает и сегодня активно участвовать в их сохранении и развитии, отдавая накопленный опыт и знания более молодым исследователям.

***Дорогой Владимир Николаевич! Поздравляем Вас с юбилеем и желаем здоровья на многие годы!
Творческих Вам успехов!***

*Дирекция, профком и сотрудники
Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Редакционная коллегия
Редакция*



УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2019 г.

Алескеров Ф.Т., Тверской Д.Н. Моделирование влияния внешней среды на возникновение специализации в абстрактных системах. — № 1. — С. 26—31.

Бабушкина Н.А., Кузина Е.А., Лоос А.А., Беляева Е.В. Математическое моделирование управления противоопухолевой вакцинотерапией. — № 5. — С. 68—83.

Борис Викторович Павлов (к 80-летию со дня рождения). — № 5. — С. 84.

Василук Н.Н. Слабое комплексирование инерциальных и спутниковых измерений с помощью расширенного фильтра Калмана с кватернионным представлением ориентации. — № 4. — С. 72—84.

Владимир Николаевич Бурков (к 80-летию со дня рождения). — № 6. — С. 76.

Волковицкий А.К. Адаптивный алгоритм управления измерениями квазистационарных периодических процессов. — № 5. — С. 60—67.

Воропай Н.И., Губко М.В., Ковалев С.П. и др. Проблемы развития цифровой энергетики в России. — № 1. — С. 2—14.

80 лет Институту проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. — № 3. — С. 81, 82.

Глушенко А.И. Адаптивный нейросетевой настройщик ПИД-регулятора для управления нагревательными печами. — № 2. — С. 60—69.

Горелов М.А. Модель управления ограничениями деятельности. — № 4. — С. 43—49.

Горидько Н.П., Нижегородцев Р.М. Принцип допустимых интервалов и экстремальные задачи в управлении макроэкономическими системами. — № 5. — С. 37—48.

Деменков Н.П., Микрин Е.А., Мочалов И.А. Методы решения нечетких систем линейных уравнений. Ч. 1. Полные системы. — № 4. — С. 3—14.

Деменков Н.П., Микрин Е.А., Мочалов И.А. Методы решения нечетких систем линейных уравнений. Ч. 2. Неполные системы. — № 5. — С. 19—28.

XXVI Международная конференция «Проблемы управления безопасностью сложных систем». — № 3. — С. 83—87.

Дорри М.Х., Рошин А.А., Серeda Л.А. Построение стенда для визуализации движения подводного аппарата по траектории. — № 1. — С. 83—86.

Евгений Александрович Федосов (к 90-летию со дня рождения). — № 2. — С. 85, 86.

Егорова Л.Г., Мячин А.Л. Структура российского сообщества экономистов и его отношение к российским экономическим журналам. Ч. 1. Анализ методами латентных классов и теории коллективного выбора. — № 3. — С. 30—42.

Егорова Л.Г., Мячин А.Л. Структура российского сообщества экономистов и его отношение к российским экономическим журналам. Ч. 2. Анализ паттернов респондентов. — № 4. — С. 50—57.

Ефремов А.Ю., Легович Ю.С. Стайное управление малыми беспилотными летательными аппаратами в среде с препятствиями. — № 3. — С. 72—80.

Завадский В.К., Иванов В.П., Каблова Е.Б., Кленовая Л.Г. Синтез квазитерминальных регуляторов. — № 5. — С. 29—36.

Зак Ю.А. Двухстадийные задачи планирования для поточной линии. — № 6. — С. 52—62.

Зак Ю.А. Построение расписаний работы сборочных конвейеров в мелко- и среднесерийном производстве. — № 2. — С. 54—59.

Квинто Я.И., Хлебников М.В. Верхние оценки отклонений траекторий в линейной динамической системе с ограниченными внешними возмущениями. — № 3. — С. 16—21.

Кузнецов Д.С., Котеленко С.А., Пятецкий В.Е. Идентификация операционной модели управления производственным комплексом. — № 2. — С. 47—53.

Кулида Е.Л., Лебедев В.Г., Егоров Н.А. Исследование эффективности алгоритма оптимизации потока воздушных судов на посадку. — № 6. — С. 63—69.

Леонидов А.В., Серебрянникова Е.Е. Исследование отклика на технологические шоки в многосекторной модели несовершенной конкуренции. — № 2. — С. 30—40.

Логиновский О.В., Гельруд Я.Д., Голлай А.В. Применение детерминированных и стохастических моделей для замены оборудования промышленных предприятий. — № 4. — С. 58—64.

Мартынова Л.А., Розенгауз М.Б. Принятие решения о выборе автономного необитаемого подводного аппарата для эффективного функционирования в группе. — № 2. — С. 70—79.

Мелехин В.Б., Хачумов В.М. Многоуровневая модель ситуационного управления технологическими процессами обработки деталей в машиностроении. — № 1. — С. 73—82.

Митришкин Ю.В., Карцев Н.М., Коньков А.Е., Патров М.И. Управление плазмой в токамаках. Ч. 3.1. Системы магнитного управления плазмой в ITER. — № 3. — С. 3—15.

Митришкин Ю.В., Карцев Н.М., Коньков А.Е., Патров М.И. Управление плазмой в токамаках. Ч. 3.2. Моделирование и реализация систем управления плазмой в ITER и конструкции DEMO. — № 4. — С. 15—26.

Новиков Д.А. Классификации систем управления. — № 4. — С. 27—42.

Одиннадцатая международная конференция «Управление развитием крупномасштабных систем» MLSD'2018. — № 2. — С. 80—84.

Подгорская С.В., Подвесовский А.Г., Исаев Р.А. и др. Моделирование сценарного развития сельских территорий на основе нечеткой когнитивной модели. — № 5. — С. 49—59.

Полунин Ю.А. Синтез методов нелинейной динамики и регрессионного анализа для исследования социально-экономических процессов. — № 1. — С. 32—44.

Промыслов В.Г., Семенов К.В., Шумов А.С. Синтез архитектуры кибербезопасности для систем управления атомных электростанций. — № 3. — С. 61—71.

Райков А.Н., Бауэр В.П., Еремин В.В. Формирование системы контроля выполнения решений в процессе государственного проектного управления. — № 2. — С. 9—18.

Рапопорт Л.Б., Тормагов Т.А. Применение методов выпуклой релаксации для оптимизации множества навигационных спутников. — № 4. — С. 65—71.

Сидельников Ю.В., Ряпухин А.В. Повышение эффективности совещаний в малых группах. Ч. 2. Нестандартные подходы к проблеме. — № 1. — С. 15—25.

Соломатин А.Н. Метод связанных проекций и его применение для визуализации многомерных данных. — № 6. — С. 41—51.

Стельмах В.С. Разработка и апробация логистической модели оценки банкротства промышленных предприятий. — № 3. — С. 43—52.

Суховеров В.С. Система автоматической обработки тематически ориентированных текстов с терминологическим словарем в формате регулярных выражений. — № 2. — С. 41—46.

Твердохлебов В.А. Z-рекуррентные структуры процессов в задачах контроля и диагностирования. — № 1. — С. 63—72.

Топка В.В. Расширенная модель инновационного проекта при бинарном воздействии его работ. — № 3. — С. 22—29.

XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ—2019). — № 6. — С. 70—75.

Трошин Д.В. Методический подход к моделированию рационального сценария обеспечения экономической безопасности России в долгосрочной перспективе. — № 1. — С. 45—54.

Угольников Г.А. Методология и прикладные задачи управления устойчивым развитием активных систем. — № 2. — С. 19—29.

Хожаев И.В., Гайворонский С.А., Езангина Т.А. Адаптивно-робастная стабилизация корневых показателей качества интервальных систем на основе метода доминирующих полюсов. — № 6. — С. 22—31.

Чесноков М.Ю. Поиск аномалий в задаче повышения качества открытых данных. — № 3. — С. 53—60.

Честнов В.Н., Александров В.А., Резков И.Г. Синтез одномерных дискретных регуляторов по инженерным критериям качества на основе модального управления. — № 6. — С. 11—21.

Честнов В.Н., Шатов Д.В. Синтез одномерных регуляторов по заданному показателю колебательности: модальный и H_∞ -подходы. — № 2. — С. 2—8.

Шевченко А.В., Мещеряков Р.В., Мигачев А.Н. Обзор состояния мирового рынка робототехники для сельского хозяйства. Ч. 1. Беспилотная агротехника. — № 5. — С. 3—18.

Шевченко А.В., Мещеряков Р.В., Мигачев А.Н. Обзор состояния мирового рынка робототехники для сельского хозяйства. Ч. 2. Беспилотные летательные аппараты и роботизированные фермы. — № 6. — С. 3—10.

Шевыренков М.Ю. Оценка влияния активных прогнозов на рынки энергоносителей на примере европейского рынка газа. — № 1. — С. 55—62.

Широкий А.А. Применимость базовых механизмов организационного управления на различных этапах комплексной деятельности. — № 6. — С. 32—40.



INDEX OF PAPERS PUBLISHED IN 2019

Aleskerov, F.T., Tverskoi, D.N. Modeling the Influence of External Factors on the Emergence of Specialization in Abstract Systems. — No. 1. — P. 26–31.

Babushkina, N.A., Kuzina, E.A., Loos, A.A., Belyaeva, E.V. Mathematical Modeling of Antitumor Vaccine Therapy Control. — No. 5. — P. 68–83.

Boris Pavlov (to the 80-th anniversary). — No. 5. — P. 84.

Chesnokov, M.Yu. Anomaly Detection for Open Data Quality Improvement. — No. 3. — P. 53–60.

Chestnov, V.N., Shatov, D.V. Design of Given Oscillation Index Scalar Controllers: Modal and H_∞ -Approaches. — No. 2. — P. 2–8.

Chestnov, V.N., Alexandrov, V.A., Rezkov, I.G. Design of Scalar Discrete Controllers Using Engineering Performance Indices on the Basis of the Modal Control. — No. 6. — P. 11–21.

Demenkov, N.P., Mikrin, E.A., Mochalov, I.A. Methods of Solving Fuzzy Systems of Linear equations. Part 1. Complete Systems. — No. 4. — P. 3–14.

Demenkov, N.P., Mikrin, E.A., Mochalov, I.A. Methods of Solving Fuzzy Systems of Linear Equations. Part 2. Incomplete Systems. — No. 5. — P. 19–28.

Dorri, M.Kh., Roshchin, A.A., Sereda, L.A. Research Stand for Visualization of the Motion of a Submersible Vehicle Along the Trajectory. — No. 1. — P. 83–86.

Efremov, A.Yu., Legovich, Yu.S. Flocking Control of Small Unmanned Aerial Vehicles in Obstacle Field. — No. 3. — P. 72–80.

Egorova, L.G., Myachin, A.L. Structure of Russian Scientific Economic Community and Its Attitude to Russian Economic Journals. Part 1: Analysis by Methods of Latent Classes and Social Choice Theory. — No. 3. — P. 30–42.

Egorova, L.G., Myachin, A.L. Structure of Russian Scientific Economic Community and Its Attitude to Russian Economic Journals. Part 2: Analysis of Respondents Patterns. — No. 4. — P. 50–57.

Eleventh International Conference «Management of Large-Scale System Development» MLSD'2018. — No. 2. — P. 80–84.

Evgenii Fedosov (to the 90-th anniversary). — No. 2. — P. 85, 86.

Glushchenko, A.I. Adaptive Neural Network Tuner of Pid-Controller for Heating Furnaces Control. — No. 2. — P. 60–69.

Gorelov, M.A. A Model of Managing Business Constraints. — No. 4. — P. 43–49.

Goridko, N.P., Nizhegorodtsev, R.M. The Principle of Permissible Intervals and Extreme Challenges in Adjustment for Macroeconomic Systems. — No. 5. — P. 37–48.

Kulida, E.L., Lebedev, V.G., Egorov, N.A. Study of the Effectiveness of the Algorithm to Optimize the Aircraft Flow for Landing. — N 6. — C. 63–69.

Kuznetsov, D.S., Kotelenko, S.A., Pyatetsky, V.E. Identification of an Operating Model of Management of the Production Complex. — No. 2. — P. 47–53.

Kvinto, Ya.I., Khlebnikov, M.V. Upper Bounds of the Trajectories Deviations in Linear Dynamical System with Bounded Exogenous Disturbances. — No. 3. — P. 16–21.

Leonidov, A.V., Serebryannikova, E.E. Analysis of Response to Technological Shocks in the Multi-Sector Model of Imperfect Competition. — No. 2. — P. 30–40.

Loginovskiy, O.V., Gelrud, Ya.D., Holloy, A.V. Application of Deterministic and Stochastic Models for Replacement of Industrial Enterprises Equipment. — No. 4. — P. 58–64.

Martynova, L.A., Rosengauz, M.B. Decision Making on Autonomous Underwater Vehicle Choice for Effective Functioning in the Group. — No. 2. — P. 70–79.

Melekhin, V.B., Khachumov, V.M. Multi-Level Model of Situational Management of Technological Processes of Machining. — No. 1. — P. 73–82.

Mitrishkin, Y.V., Kartsev, N.M., Konkov, A.E., Patrov, M.I. Plasma Control in Tokamaks. Part 3.1. Plasma Magnetic Control Systems in ITER. — No. 3. — P. 2–15.

Mitrishkin, Y.V., Kartsev, N.M., Konkov, A.E., Patrov, M.I. Plasma Control in Tokamaks. Part 3.2. Simulation and Realization of Plasma Control Systems in ITER and Constructions of DEMO. — No. 4. — P. 15–26.

Novikov, D.A. Control Systems Classification. — No. 4. — P. 27–42.

Ougolnitsky, G.A. Methodology and Applied Problems of the Sustainable Management in Active Systems. — No. 2. — P. 19–29.

Podgorskaya, S.V., Podvesovskii, A.G., Isaev, R.A., et al. Modeling of Scenario Development of Rural Territories Based on Fuzzy Cognitive Model. — No. 5. — P. 49—59.

Polunin, Yu.A. Synthesis of Nonlinear Dynamics Methods and Regression Analysis for the Study of Socio-Economic Processes. — No. 1. — P. 32—44.

Promyslov, V.G., Semenov, K.V., Shumov, A.S. Security Model for Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Plants. — No. 3. — P. 61—71.

Raikov, A.N., Bauer, V.P., Eremin, V.V. Forming the System of Decisions Execution Control in State Project Management. — No. 2. — P. 9—18.

Rapoport, L.B., Tormagov, T.A. Relaxation Methods for Navigation Satellites Set Optimization. — No. 4. — P. 65—71.

Shevchenko, A.V., Meshcheryakov, R.V., Migachev, A.N. Review of the World Market of Agriculture Robotics. Part 1. Unmanned Vehicles for Agriculture. — No. 5. — P. 3—18.

Shevchenko, A.V., Meshcheryakov, R.V., Migachev, A.N. Review of the World Market of Agriculture Robotics. Part 2. Unmanned Aerial Vehicles and Robotic Farms. — No. 6. — C. 3—10.

Shirokii, A.A. Basic Organizational Control Mechanisms Applicability at Different Stages of Integrated Activity. — No. 6. — C. 32—40.

Shevyrenkov, M.Yu. Evaluation of the Influence of Active Forecasts on the Energy Markets on the Example of the European Gas Market. — No. 1. — P. 55—62.

Sidelnikov, Yu.V., Ryapukhin, A.V. Improving the Effectiveness of Meetings in Small Groups. Part 2. Non-Standard Approaches to the Problem. — No. 1. — P. 15—25.

Solomatin, A.N. Method of Connected Projections and its Use for Multidimensional Data Visualization. — No. 6. — C. 41—51.

Stelmakh, V.S. Development and Testing of Logit-Model to Estimate Bankruptcy of Industrial Enterprises. — No. 3. — P. 43—52.

Sukhoverov, V.S. System of Thematically-Oriented Texts Automatic Processing with Dictionary of Terms in the Form of Regular Expressions. — No. 2. — P. 41—46.

Topka, V.V. Extended Model of the Innovative Project with Binary Interaction of its Activities. — No. 3. — P. 22—29.

Troshin, D.V. Methodical Approach to Modeling of the Rational Scenario of Ensuring Economic Security of Russia in the Long Term. — No. 1. — P. 45—54.

Tverdokhlebov, V.A. Z-Recurrent Process Structures in Problems of Control and Diagnostics. — No. 1. — P. 63—72.

Vasilyuk, N.N. Inertial and Satellite Navigation Measurements Loose Coupling Using the Extended Kalman Filter with Attitude Quaternion. — No. 4. — P. 72—84.

Vladimir Burkov (to the 80-th anniversary). — No. 6. — P. 76.

Volkovitskiy, A.K. Adaptive Algorithm of Quasi-Stationary Periodic Processes Measurements Control. — No. 5. — P. 60—67.

Voropay, N.I., Gubko, M.V., Kovalev, S.P., et al. Digital Energy Development Problems in Russia. — No. 1. — P. 2—14.

80 Years Anniversary of V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences. — No. 3. — P. 81, 82.

XIII All-Russia Control Conference (VSPU-2019). — No. 6. — C. 70—75.

XXVI International Conference «The Problems of Complex Systems Security Control». — No. 3. — P. 83—87.

Zack, Yu.A. Building the Assembly Line Timetables in Small- and Medium-Scale Production. — No. 2. — P. 54—59.

Zack, Yu.A. Two-Stage Planning Tasks for the Production Line. — No. 6. — P. 52—62.

Zavatsky, V.K., Ivanov, V.P., Kablova, E.B., Clenovaya, L.G. Quasi-Terminal Controllers Synthesis. — No. 5. — P. 29—36.



Не забудьте подписаться!

Если Вы не успели подписаться на журнал «Проблемы управления», то подписку можно оформить через редакцию по льготной цене с любого месяца, при этом почтовые расходы редакция берет на себя. Позвоните по телефону (495) 330-42-66 или обратитесь по электронной почте ru@ipu.ru, и подписка будет оформлена за один день. Отдельные номера редакция высылает по первому требованию.

Рисунок к статье Соломатина А.Н.
**«МЕТОД СВЯЗАННЫХ ПРОЕКЦИЙ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ
 МНОГОМЕРНЫХ ДАННЫХ»** (с. 41–51)

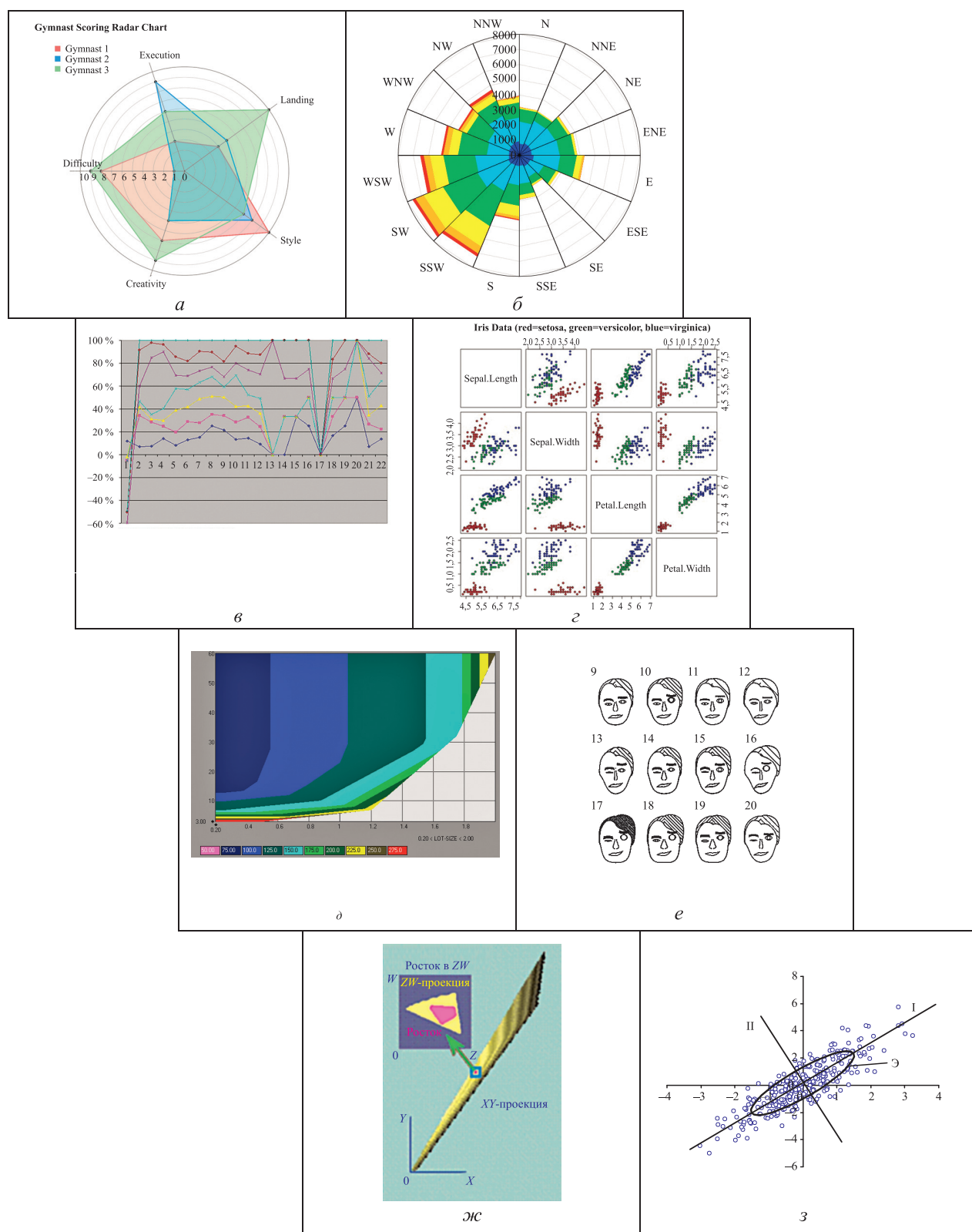


Рис. 1. Методы визуализации многомерных данных: *а* – радарные (лепестковые, сетчатые диаграммы); *б* – звездные диаграммы; *в* – профили; *г* – матричные графики; *д* – карты решений; *е* – лица Чернова; *ж* – проекции без потерь (метод ростка); *з* – методы понижения размерности

