

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 27

2021

№ 1

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

САПР

КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА

МЕТОДЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ

ОПЕРАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДЫ

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

НЕЙРОСЕТИ И
НЕЙРОКОМПЬЮТЕРЫ

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ
СИСТЕМЫ

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

ОПТИМИЗАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

ИТ В ОБРАЗОВАНИИ

ГИС



Поздравляем с юбилеем **члена редколлегии журнала** **«Информационные технологии»** **Вадима Анатольевича** **Шахнова**

Вадим Анатольевич Шахнов родился 29 января 1941 г. в Москве. В 1961 г. он поступил в МВТУ им. Н. Э. Баумана на кафедру «Вычислительные машины» (П6). В сентябре 1966 г., закончив МВТУ им. Н.Э. Баумана, В. А. Шахнов приступил к работе в Зеленограде, где начал заниматься исследованиями быстропротекающих процессов в тонких магнитных плёнках и проблемами разработки быстродействующих запоминающих устройств ЭВМ. С 1970 г. В. А. Шахнов участвует в разработках мини- и микроЭВМ, микропроцессоров и микропроцессорных средств вычислительной техники в Специализированном вычислительном центре (СВЦ), руководимом Д. И. Юдицким. С 1976 г. В. А. Шахнов руководит работой отраслевого отдела микропроцессоров и микропроцессорных средств вычислительной техники Минэлектронпрома СССР, координируя работы всех предприятий отрасли в этом важнейшем направлении развития науки и технологии. В 1983 г. Вадиму Анатольевичу Шахнову была присуждена премия Совета Министров СССР в области науки и техники, в 1985 г. – Государственная премия СССР в области науки и техники за разработку и внедрение специальной техники на базе микропроцессоров. В 1989 году за успешную работу по внедрению микропроцессоров в космическую аппаратуру Федерация космонавтики СССР наградила Вадима Анатольевича Шахнова медалью им. академика М. В. Келдыша.

В 1991 г. В. А. Шахнов был приглашен в МГТУ им. Н. Э. Баумана, где возглавил кафедру «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» (ИУ4). В этом же году он защитил докторскую диссертацию на тему «Системное конструирование ЭВМ на больших интегральных схемах». В 1996 г. Вадиму Анатольевичу Международным обществом инженерной педагогики присвоено почётное звание «Европейский инженер-педагог». За вклад в развитие электронной техники в 1999 г. В. А. Шахнову был вручен Памятный знак «90 лет со дня рождения Александра Ивановича Шокина» Российским Агентством по системам управления. В 2001 г. В. А. Шахнову присвоено звание Лауреата премии Правительства РФ в области науки и техники. Возглавляемая им научная школа «Конструкторско-технологическая информатика в радиоэлектронике» отмечена грантами Президента РФ в 2006, 2008, 2010, 2012 и 2014 гг.

Его заслуги были отмечены рядом государственных наград, в том числе и медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени (2005) и медалями «Ветеран труда» (1987), «В память 800-летия Москвы» (1997). В 2001 г. ему было присвоено почётное звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации». 29 мая 2008 г. Вадим Анатольевич Шахнов был избран членом-корреспондентом РАН. В 2012 г. он был награждён медалью ЮНЕСКО «За вклад в развитие нанонауки и нанотехнологий». В 2016 г. за заслуги в развитии науки, образования, подготовке квалифицированных специалистов и многолетнюю плодотворную работу Вадим Анатольевич был награждён орденом Дружбы.

**Весь коллектив редколлегии журнала «Информационные технологии»
сердечно поздравляет Вадима Анатольевича с юбилеем и желает ему
многих лет жизни, творческих успехов и большого человеческого счастья!**

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 27
2021
№ 1

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с ноября 1995 г.

DOI 10.17587/issn.1684-6400

УЧРЕДИТЕЛЬ

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ

- Ульянов М. В., Фомичёв М. И. Исследование особенностей применения комбинированного алгоритма для решения асимметричной задачи коммивояжера 3

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

- Буй В. Ф., Гаврюшин С. С., Фунг В. Б., Данг Х. М., Прокопов В. С. Автоматизация и управление процессом проектирования главного привода моечной машины нового типа для овощей и фруктов 9

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

- Игнатьев Н. А., Лолаев М. Я. Анализ соответствия структур отношений объектов классов на многообразиях их описаний 18

БАЗЫ ДАННЫХ

- Пенькова Т. Г., Кочетков С. Н. Технологический подход к организации унифицированного обмена данными между гетерогенными системами 25

ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Гриняк В. М. Проектирование системы 3D-позиционирования внутри помещений на основе Bluetooth-устройств 32
- Комаров В. А., Сарафанов А. В., Тумковский С. Р. Опыт цифровой трансформации бизнес-процессов прикладных экспериментальных исследований посредством мультиарендности их ресурсного обеспечения 41
- Доронина Е. Б., Скاتков А. В. Задача анализа эффективности ремонтно-профилактических работ сложной технической аппаратуры 51

Главный редактор:

СТЕМПКОВСКИЙ А. Л.,
акад. РАН, д. т. н., проф.

Зам. главного редактора:

ИВАННИКОВ А. Д., д. т. н., проф.
ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с.н.с.

Редакционный совет:

БЫЧКОВ И. В., акад. РАН, д. т. н.

ЖУРАВЛЕВ Ю. И.,

акад. РАН, д. ф.-м. н., проф.

КУЛЕШОВ А. П.,

акад. РАН, д. т. н., проф.

ПОПКОВ Ю. С.,

акад. РАН, д. т. н., проф.

РУСАКОВ С. Г.,

чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.

РЯБОВ Г. Г.,

чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.

СОЙФЕР В. А.,

акад. РАН, д. т. н., проф.

СОКОЛОВ И. А.,

акад. РАН, д. т. н., проф.

СУЕТИН Н. В., д. ф.-м. н., проф.

ЧАПЛЫГИН Ю. А.,

акад. РАН, д. т. н., проф.

ШАХНОВ В. А.,

чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.

ШОКИН Ю. И.,

акад. РАН, д. т. н., проф.

ЮСУПОВ Р. М.,

чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.

Редакционная коллегия:

АВДОШИН С. М., к. т. н., доц.

АНТОНОВ Б. И.

БАРСКИЙ А. Б., д. т. н., проф.

ВАСЕНИН В. А., д. ф.-м. н., проф.

ВАСИЛЬЕВ В. и., д. т. н., проф.

ВИШНЕКОВ А. В., д. т. н., проф.

ДИМИТРИЕНКО Ю. И., д. ф.-м. н., проф.

ДОМРАЧЕВ В. Г., д. т. н., проф.

ЗАБОРОВСКИЙ В. С., д. т. н., проф.

ЗАРУБИН В. С., д. т. н., проф.

КАРПЕНКО А. П., д. ф.-м. н., проф.

КОЛИН К. К., д. т. н., проф.

КУЛАГИН В. П., д. т. н., проф.

КУРЕЙЧИК В. В., д. т. н., проф.

ЛЬВОВИЧ Я. Е., д. т. н., проф.

МАРТЫНОВ В. В., д. т. н., проф.

МИХАЙЛОВ Б. М., д. т. н., проф.

НЕЧАЕВ В. В., к. т. н., проф.

ПОЛЕШУК О. М., д. т. н., проф.

ПРОХОРОВ С. А., д. т. н., проф.

САКСОНОВ Е. А., д. т. н., проф.

СОКОЛОВ Б. В., д. т. н., проф.

СОЛОВЬЕВ Р. А., д. т. н., в. н. с.

ТИМОНИНА Е. Е., д. т. н., проф.

УСКОВ В. Л., к. т. н. (США)

ФОМИЧЕВ В. А., д. т. н., проф.

ШИЛОВ В. В., к. т. н., доц.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу <http://novtex.ru/IT>.
Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования и базу данных RSCI на платформе Web of Science.

Журнал входит в Перечень научных журналов, в которых по рекомендации ВАК РФ должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

INFORMATION TECHNOLOGIES

INFORMACIONNYYE TEHNOLOGII

Vol. 27
2021
No. 1

THEORETICAL AND APPLIED SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since November 1995

DOI 10.17587/issn.1684-6400

ISSN 1684-6400

CONTENTS

MODELING AND OPTIMIZATION

Ulyanov M. V., Fomichev M. I. Research of Features of the Combined Algorithm for Solving the Asymmetric Traveling Salesman Problem 3

CAD-SYSTEMS

Bui V. P., Gavruishin S. S., Phung V. B., Dang H. M., Prokopov V. S. Automation and Management of Design Process of the Main Drive for an Innovative Fruits and Vegetables Washer 9

DIGITAL PROCESSING OF SIGNALS AND IMAGES

Ignat'ev N. A., Lolaev M. Y. An Analysis of the Compliance of the Structures of Relations of Objects of Classes on the Varieties of their Descriptions 18

DATABASE

Penkova T. G., Kochetkov S. N. Technological Approach to the Organization of a Unified Data Exchange between Heterogeneous Systems 25

APPLICATION INFORMATION SYSTEMS

Grinyak V. M. Configuration of 3D Indoor Positioning System Based on Bluetooth Beacons 32

Komarov V. A., Sarafanov A. V., Tumkovskiy S. R. The Experience of Digital Transformation of Business Processes of Applied Experimental Research by Using the Multitenancy of the Resources 41

Doronina E. B., Skatkov A. V. The Task of Analyzing the Effectiveness of Repair and Maintenance Work of Complex Technical Equipment 51

Editor-in-Chief:

Stempkovsky A. L., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Deputy Editor-in-Chief:

Ivannikov A. D., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Filimonov N. B., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Chairman:

Bychkov I. V., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Zhuravljov Yu. I., Member of RAS,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Kuleshov A. P., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Popkov Yu. S., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Rusakov S. G., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Ryabov G. G., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Soifer V. A., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Sokolov I. A., Member of RAS,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Suetin N. V.,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Chaplygin Yu. A., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shakhnov V. A., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shokin Yu. I., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Yusupov R. M., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Editorial Board Members:

Avdoshin S. M., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.
Antonov B. I.
Barsky A. B., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Vasenin V. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Vasiliev V. I., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Vishnekov A. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Dimitrienko Yu. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Domrachev V. G., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Zaborovsky V. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Zarubin V. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Karpenko A. P., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Kolin K. K., Dr. Sci. (Tech.)
Kulagin V. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Kureichik V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Ljvovich Ya. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Martynov V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Mikhailov B. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Nechaev V. V., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.
Poleschuk O. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Prokhorov S. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Saksonov E. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Sokolov B. V., Dr. Sci. (Tech.)
Solovyev R. A., Dr. Sci. (Tech.)
Timonina E. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Uskov V. L. (USA), Dr. Sci. (Tech.)
Fomichev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shilov V. V., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.

Editors:

Bezmenova M. Yu.

Complete Internet version of the journal at site: <http://novtex.ru/IT>.

According to the decision of the Higher Certifying Commission of the Ministry of Education of Russian Federation, the journal is inscribed in "The List of the Leading Scientific Journals and Editions wherein Main Scientific Results of Theses for Doctor's or Candidate's Degrees Should Be Published"

М. В. Ульянов, д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотр., проф., e-mail: muljanov@mail.ru,
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН,
М. И. Фомичёв, аспирант, ст. преподаватель, e-mail: michan94@yandex.ru,
Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,
Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"

Исследование особенностей применения комбинированного алгоритма для решения асимметричной задачи коммивояжера¹

Рассматривается точный алгоритм для решения асимметричной задачи коммивояжера, представляющий собой комбинацию метода ветвей и границ и метаэвристического алгоритма Лина—Кернигана—Хельсгауна, используемого для получения предвычисленного тура при запуске метода ветвей и границ. Сокращение числа вершин порожденного дерева решений в методе ветвей и границ за счет "хорошего" предвычисленного тура приводит к классической дилемме о балансе временных затрат. Тур, близкий к оптимальному, требует временных затрат даже при использовании алгоритма Лина—Кернигана—Хельсгауна, но сокращает время работы метода ветвей и границ. Возникает задача определения области применения такого комбинированного алгоритма, которая решается в данной статье за счет использования специальной характеристики индивидуальных задач коммивояжера — числа изменений направления обхода в поисковом дереве решений, порождаемом методом ветвей и границ. Использование данной характеристики позволило разделить индивидуальные задачи на три категории, для которых на основе экспериментальных данных сформулированы рекомендации по применению комбинированного алгоритма. На основе полученных в вычислительном эксперименте данных (в диапазоне размерностей от 30 до 45) рекомендуется применение комбинированного алгоритма для задач категории III, начиная с $n = 36$, и для задач категории II, начиная с $n = 42$.

Ключевые слова: задача коммивояжера, метод ветвей и границ, предвычисленный тур, комбинированные алгоритмы, алгоритм Лина—Кернигана—Хельсгауна

Введение

В настоящее время задача коммивояжера является востребованной задачей дискретной оптимизации, поскольку достаточно много практически значимых постановок в области бизнес-информатики и логистики сводится к классической задаче коммивояжера, причем, как правило, в ее наиболее сложной асимметричной постановке. Задача заключается в поиске гамильтонова цикла с минимальной стоимостью в полном асимметричном графе без собственных петель. Востребованность точных решений приводит к необходимости применения точных алгоритмов ее решения, одним из которых является алгоритм, реализу-

ющий метод ветвей и границ, предложенный Дж. Литл, К. Мурти, Д. Суини и К. Кэрл [1]. Принадлежность задачи коммивояжера к NP-трудным задачам приводит к надполиномиальной сложности всех предложенных сегодня точных алгоритмов. Известно [2], что реализации метода ветвей и границ для этой задачи имеют экспоненциальную временную сложность и логнормальное распределение числа порожденных вершин поискового дерева при фиксированной размерности, что приводит к существенному росту временных затрат для практически востребованных постановок.

Сокращение времени получения точного решения при использовании метода ветвей и границ возможно за счет применения различных модификаций и специальных приемов. Так, например, известный подход, связанный с использованием дополнительной памяти, ис-

¹Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-07-00656.

следованный авторами в работах [3, 4], позволяет сократить время решения, но этого явно недостаточно и, более того, требует значительных объемов оперативной памяти. Еще один подход, приводящий к сокращению времени решения задачи коммивояжера, базируется на сокращении числа вершин в поисковом дереве решений. Такое сокращение обеспечивается с помощью тура коммивояжера (так называемого предвычисленного тура), полученного до начала работы метода ветвей и границ некоторым метаэвристическим алгоритмом. Очевидно, что есть смысл использовать только такой метаэвристический алгоритм, который обеспечит не только существенное сокращение поискового дерева решений, но и сокращение суммарного времени решения, включающего в себя и время выполнения программной реализации самого метаэвристического алгоритма. Авторами ранее в работах [5, 6] было проведено исследование различных метаэвристических алгоритмов и показано, что наиболее целесообразно использовать для получения предвычисленного тура алгоритм, предложенный Лином и Керниганом [7], который основан на идее итерационного улучшения случайно полученного тура, и очень успешно модифицированный Хельсгауном [8, 9]. Отметим, что и алгоритм Лина—Кернигана и его модификация Хельсгауном относятся к симметричной задаче коммивояжера. Однако с использованием метода трансформации, предложенного в работе [10], любая несимметричная задача коммивояжера размерности n может быть преобразована в симметричную задачу коммивояжера размерности $2n$. К сожалению, эта трансформация также влияет на время решения несимметричной задачи коммивояжера алгоритмом Лина—Кернигана—Хельсгауна.

В рамках любого комбинированного алгоритма возникает задача определения его области применения, т.е. таких размерностей и таких особенностей задач, при которых применение комбинированного алгоритма было бы целесообразным. Для предложенного авторами в работах [5, 6] комбинированного алгоритма, основанного на методе ветвей и границ с предвычисленным туром, полученным алгоритмом Лина—Кернигана—Хельсгауна, представляет интерес определение размерностей и особенностей индивидуальных задач, при которых программная реализация комбинированного алгоритма показывает лучшую временную эффективность по сравнению с реализацией классического метода ветвей и

границ. Одному из подходов к решению этой задачи и посвящена настоящая статья.

Задача коммивояжера и постановка задачи исследования

Приведем используемую далее терминологию и обозначения, связанные с задачей коммивояжера. Асимметричная задача коммивояжера — это задача нахождения гамильтонова цикла минимального веса в полном взвешенном ориентированном графе без собственных петель. Полный взвешенный ориентированный граф с n вершинами задается взвешенной матрицей смежности A размерности n , элементы которой определяют веса дуг между вершинами полного графа. Собственные петли запрещаются специальными значениями на главной диагонали матрицы.

Терминологически в задаче коммивояжера гамильтонов цикл в полном графе называется *туром*, а матрица смежности A называется *матрицей стоимостей*, поскольку в содержательной постановке задачи коммивояжера веса дуг интерпретируются как стоимости проезда между городами. Число вершин графа n , определяющее размерность матрицы стоимостей, называется *размерностью задачи коммивояжера*. Далее рассматривается асимметричная задача коммивояжера, которая представляет собой наиболее общую и вычислительно трудную постановку задачи. Очевидно, что начальная вершина тура может быть выбрана произвольно. Таким образом, множество всех возможных туров определяется всеми возможными перестановками остальных вершин и имеет мощность $(n - 1)!$. Под термином *индивидуальная задача* будем понимать конкретный экземпляр задачи коммивояжера — это задача, заданная конкретной матрицей стоимостей A размерности n .

Постановка задачи в данной статье предполагает определение таких размерностей задачи и таких особенностей индивидуальных задач, при которых целесообразно использовать комбинированный алгоритм метода ветвей и границ и алгоритм Лина—Кернигана—Хельсгауна, применяемый для получения предвычисленного тура.

Очевидным инструментом исследования является вычислительный эксперимент в рамках некоторого диапазона размерностей задачи со значительной по объему выборкой экспериментальных данных.

Описание вычислительного эксперимента

Эксперименты проводили на стационарном компьютере со следующими характеристиками:

- процессор: Intel i7 3770K 3800 MHz;
- оперативная память: Kingston KHX1600C9D3P1 16 Гбайт;
- материнская плата: ASRock Fatalty Z370 Gaming K6;
- операционная система: GIGABYTE GA-Z77X-D3H.

Для минимизации шумов операционной системы фоновые процессы, которые не нужны для исследования, были отключены, также отсутствовал графический пользовательский интерфейс, а управление операционной системой осуществлялось посредством командной строки.

Алгоритмы были реализованы на языке C++ и скомпилированы в исполняемый файл с помощью компилятора: gcc 4.8.5 20150623.

Для экспериментального анализа были сгенерированы несимметричные задачи коммивояжера для размерностей от 30 до 45 с шагом один. Объем выборки для каждой размерности составил 10 000 индивидуальных задач. Веса дуг для асимметричных матриц индивидуальных задач — целые числа в диапазоне от 1 до 10^6 — были сгенерированы равномерным генератором псевдослучайных чисел.

В ходе вычислительного эксперимента были получены времена решения индивидуальной задачи коммивояжера классическим алгоритмом, реализующим метод ветвей и границ (ARS), и комбинированным алгоритмом, реализующим метод ветвей и границ с расчетом предвычисленного тура с помощью алгоритма Лина—Кернигана—Хельсгауна (ARS_{LKH}). Кроме того, для каждой индивидуальной задачи коммивояжера в ходе ее решения классическим методом ветвей и границ было определено число изменений направления обхода в поисковом дереве решений. Эта характеристика поискового дерева решений была ранее введена одним из авторов в работе [11].

Обсуждение и результаты

Предложенная в работе [11] новая характеристика динамики поискового дерева решений, порождаемого методом ветвей и границ для задачи коммивояжера, — число изменений направления обхода дерева — представляется перспективной для выделения категорий задач с предпочтительным использованием комбини-

рованного алгоритма. Обозначим $J(A)$ — число изменений направления обхода в поисковом дереве решений в классическом алгоритме, где A — индивидуальная задача коммивояжера размерностью n . Обозначим J_n — множество всех значений $J(A)$, полученных по результатам вычислительного эксперимента на задачах размерности n .

Рассматривая J_n как выборку из случайной величины в 10 000 значений для каждой размерности n , определим квантили распределения значений $J(A)$. В табл. 1 представлены 0.25-, 0.5-, 0.75-, 0.9-, 0.95-, 0.99-, 0.995- и 0.999-квантили J_n для исследованного диапазона размерностей.

Основываясь на ранее полученных нами результатах [5, 6] по исследованию комбинированного алгоритма, логично предположить, что он будет эффективен по времени для сложных задач, начиная с некоторой размерности. Это наблюдение связано с тем, что для небольших размерностей классический метод ветвей и границ работает достаточно эффективно, а время на вычисление предвычисленного тура не компенсируется эффектом от сокращения поискового дерева решений. В качестве меры такой сложности мы предлагаем использовать значение $J(A)$ — число изменений направления обхо-

Таблица 1

Квантили J_n

n	$q_{0,25}$	$q_{0,5}$	$q_{0,75}$	$q_{0,9}$	$q_{0,95}$	$q_{0,99}$	$q_{0,995}$	$q_{0,999}$
30	98	202	399	728	1060	2081	2681	4595
31	113	235	468	891	1278	2531	3239	4614
32	135	279	560	1040	1525	3020	3671	6447
33	157	331	674	1272	1845	3666	4884	7810
34	184	384	808	1513	2211	4157	5482	9433
35	213	454	948	1788	2587	5319	6674	10444
36	261	548	1144	2211	3209	6815	8692	14524
37	292	637	1341	2586	3919	7832	11186	16525
38	346	770	1645	3251	4792	10115	14920	26924
39	415	895	1949	3878	5723	12452	18274	28192
40	477	1053	2309	4637	7134	15702	21785	38952
41	564	1261	2779	5588	8876	19227	26074	52206
42	655	1431	3272	6671	10163	24215	30738	59467
43	777	1775	3960	7941	12134	27325	39235	65875
44	870	2024	4575	9366	14505	31184	42119	71376
45	1016	2419	5424	11656	18507	42447	57381	124804

Нормированные квантили J_n по 0,99 квантили

n	$\frac{q_{0,25}}{q_{0,99}}$	$\frac{q_{0,5}}{q_{0,99}}$	$\frac{q_{0,75}}{q_{0,99}}$	$\frac{q_{0,9}}{q_{0,99}}$	$\frac{q_{0,95}}{q_{0,99}}$	$\frac{q_{0,99}}{q_{0,99}}$	$\frac{q_{0,995}}{q_{0,99}}$	$\frac{q_{0,999}}{q_{0,99}}$
30	0,047	0,097	0,192	0,35	0,509	1	1,288	2,208
31	0,045	0,093	0,185	0,352	0,505	1	1,280	1,823
32	0,045	0,092	0,185	0,344	0,505	1	1,216	2,135
33	0,043	0,090	0,184	0,347	0,503	1	1,332	2,130
34	0,044	0,092	0,194	0,364	0,532	1	1,319	2,269
35	0,040	0,085	0,178	0,336	0,486	1	1,255	1,964
36	0,038	0,080	0,168	0,324	0,471	1	1,275	2,131
37	0,037	0,081	0,171	0,330	0,504	1	1,428	2,110
38	0,034	0,076	0,163	0,321	0,474	1	1,475	2,662
39	0,033	0,072	0,157	0,311	0,46	1	1,468	2,264
40	0,030	0,067	0,147	0,295	0,454	1	1,387	2,481
41	0,029	0,066	0,145	0,291	0,462	1	1,356	2,715
42	0,027	0,059	0,135	0,275	0,420	1	1,269	2,456
43	0,028	0,065	0,145	0,291	0,444	1	1,436	2,411
44	0,028	0,065	0,147	0,304	0,465	1	1,351	2,289
45	0,024	0,057	0,128	0,275	0,436	1	1,352	2,940

да в поисковом дереве решений в классическом алгоритме. Большие значения $J(A)$ могут свидетельствовать в пользу применения комбинированного алгоритма для задач данной размерности. На этом основании мы выбрали квантиль 0,99 в качестве базового значения для выделения категории индивидуальных задач. Результаты нормировки значений полученных квантилей по 0,99-квантили представлены в табл. 2.

Заметим, что нормированные значения квантилей 0,95 очень близки к 0,5 для всех исследованных размерностей. На основании полученных экспериментальных результатов мы предлагаем выделить следующие три категории индивидуальных задач:

I. Задачи, для которых $J(A) < q_{0,95}$ (нормированный квантиль меньше 0,5).

II. Задачи, для которых $q_{0,95} \leq J(A) < q_{0,995}$ (нормированный квантиль между 0,5 и 1,5).

III. Задачи, для которых $J(A) \geq q_{0,995}$ (нормированный квантиль больше 1,5).

Таким образом, зная число изменений направления обхода поискового дерева решений, полученное с использованием классического алгоритма, можно отнести каждую задачу из нашей экспериментальной выборки к одной из трех введенных категорий (I, II или III).

В экспериментальном исследовании мы получили времена t_{ARS} решения индивидуаль-

ных задач коммивояжера классическим алгоритмом, реализующим метод ветвей и границ (ARS), и $t_{ARS_{LKH}}$ — времена решения комбинированным алгоритмом, реализующим метод ветвей и границ с расчетом предвычисленного тура на основе алгоритма Лина—Кернигана—Хелсгауна (ARS_{LKH}). На основе полученных данных о временах решения (t_{ARS} и $t_{ARS_{LKH}}$) и категории каждой задачи, мы определили долю задач, для которых комбинированный алгоритм работал быстрее в разрезе каждой категории. Эти результаты приведены в табл. 3.

Данные табл. 3 показывают, что для задач категории I применение комбинированного алгоритма практически не целесообразно в исследованном диапазоне размерностей. Для задач, относящихся к категории II, его применение эффективно только в конце диапазона размерностей, а для задач III категории — уже начиная с середины изученного диапазона. Очевидно, остается открытым вопрос об определении сложности индивидуальной задачи в смысле характеристики $J(A)$, которую авторы связывают с другой характеристикой сложности индивидуальной задачи $S(A)$, исследованию которой посвящена работа [2].

Дополнительно проиллюстрируем данные табл. 3 в виде графиков, которые показаны на рисунке (см. третью сторону обложки).

Таблица 3

Эффективность ARS_{LKH} по категориям

n	Доля задач категории I, для которых эффективен комбинированный алгоритм, %	Доля задач категории II, для которых эффективен комбинированный алгоритм, %	Доля задач категории III, для которых эффективен комбинированный алгоритм, %
30	2,980	11,504	25,49
31	4,906	9,778	21,569
32	2,095	9,556	27,451
33	2,937	9,778	54,902
34	1,758	9,333	52,941
35	1,560	20,701	70,588
36	1,495	26,000	88,235
37	1,516	37,694	86,275
38	1,358	55,333	98,039
39	1,948	67,111	96,078
40	3,432	81,778	98,039
41	5,632	91,131	98,000
42	8,253	95,100	100,000
43	11,907	94,678	100,000
44	16,191	98,222	100,000
45	20,531	99,557	100,000

Полученные экспериментальные результаты позволяют говорить, что предвычисленный тур, полученный с помощью алгоритма Лина—Керниган—Хелсгауна, оказывает существенное влияние, сокращая время по сравнению с классическим алгоритмом, для задач категории III, начиная с $n = 36$, и для задач категории II, начиная с $n = 42$. Кроме того, с ростом размера задачи предвычисленный тур, полученный алгоритмом Лина—Кернигана—Хелсгауна в комбинированном алгоритме, все более влияет на сокращение суммарного времени точного решения асимметричной задачи коммивояжера для каждой из категорий. Однако доля задач категории I, для которых применение комбинированного алгоритма оправдано, мало даже для $n = 45$ и составляет только 20,5 %.

Заключение

Таким образом, на основании полученных экспериментальных результатов можно сделать следующие выводы, связанные с исследованным точным комбинированным алгорит-

мом для решения асимметричной задачи коммивояжера:

- на основании нормированных квантилей значений $J(A)$ (число изменений направления обхода в поисковом дереве решений) в статье предложено разделение индивидуальных асимметричных задач коммивояжера на три категории в целях выявления задач, для которых применение комбинированного алгоритма (метод ветвей и границ + алгоритм Лина—Кернигана—Хельсгауна) целесообразно в смысле временной эффективности;
- на основе полученных экспериментальных результатов по времени мы констатируем (в рамках исследованного диапазона размерностей от 30 до 45), что применение комбинированного алгоритма целесообразно и сокращает время получения решения по сравнению с классическим алгоритмом для задач категории III, начиная с $n = 36$, и для задач категории II, начиная с $n = 42$.

Авторы видят дальнейшее развитие исследования в поиске таких алгоритмов, которые позволили бы определить характеристику динамики поискового дерева решений, порождаемого методом ветвей и границ для асимметричной задачи коммивояжера, — число изменений направления обхода с полиномиальной сложностью, позволяя тем самым эффективно принимать решение об использовании комбинированного алгоритма.

Список литературы

1. Little J. D. C., Murty K. G., Sweeney D. W., Karel C. An algorithm for the traveling salesman problem // Operations Research. 1963. Vol. 11 P. 972—989.
2. Goloveshkin V. A., Zhukova G. N., Ulyanov M. V., Fomichev M. I. Probabilistic Prediction of the Complexity of Traveling Salesman Problems Based on Approximating the Complexity Distribution from Experimental Data // Automation and Remote Control. 2018. Vol. 79, Iss. 7. P 1296—1310.
3. Ulyanov M. V., Fomichev M. I. Resource characteristics of ways to organize a decision tree in the branch-and-bound method for the traveling salesman problem // Business Informatics. 2015. № 4 (34). P. 38—46.
4. Ульянов М. В., Фомичев М. И. Подходы к организации поискового дерева решений в методе ветвей и границ для асимметричной задачи коммивояжера // Информационные технологии. 2018. № 11, Т. 24., С. 698—704. DOI: 10.17587/it.24.698-704.
5. Ульянов М. В., Фомичев М. И. Сравнительный анализ комбинаций метода ветвей и границ с метаэвристическими алгоритмами для решения асимметричной задачи коммивояжера. // Информационные технологии. 2019. Т. 25, № 10. С. 590-595. DOI 10.17587/it.25.
6. Zhukova G. N., Ulyanov M. V., Fomichev M. A. Hybrid Exact Algorithm for the Asymmetric Traveling Salesman Problem: Construction and a Statistical Study of Computational Efficiency

// Automation and Remote Control. 2019. Vol. 80, N. 11. P. 2054–2067. DOI: 10.1134/S0005117919110092

7. **Lin S., Kernighan B. W.** An effective heuristic algorithm for the traveling-salesman problem // *Operations Research*. 1973. Vol. 21, N. 2. P. 498–516.

8. **Helsgaun K.** An effective implementation of the Lin–Kernighan traveling salesman heuristic // *European Journal of Operational Research*. 2000. Vol. 126, N. 1. P. 106–130.

9. **Helsgaun K.** An extension of the Lin–Kernighan–Helsgaun TSP solver for constrained traveling salesman and

vehicle routing problems // Technical Report. Roskilde: Roskilde University, 2017.

10. **Jonker R., Volgenant T.** Transforming asymmetric into symmetric traveling salesman problems // *Operations Research Letters*. 1983. N. 2. P. 161–163.

11. **Фомичев М. И.** Об одной оценке индивидуальной задачи коммивояжера // Тезисы XX Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. г. Новосибирск, Россия, 28 октября – 1 ноября. С. 86–87.

M. V. Ulyanov, Leading Researcher, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, M. V. Lomonosov Moscow State University

M. I. Fomichev, Doctoral Student Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev, Lecturer of Faculty of Computer Science, School of Software Engineering National Research University Higher School of Economics

Research of Features of the Combined Algorithm for Solving the Asymmetric Traveling Salesman Problem

The exact algorithm that implements the Branch and Bound method with precomputed tour which is calculated by Lin–Kernighan–Helsgaun metaheuristic algorithm for solving the Traveling Salesman Problem is concerned here. Reducing the number of decision tree nodes, which are created by the Branches and Bound method, due to a "good" precomputed tour leads to the classical balancing dilemma of time costs. A tour that is close to optimal one takes time, even when the Lin–Kernighan–Helsgaun algorithm is used, however it reduces the working time of the Branch and Bound method. The problem of determining the scope of such a combined algorithm arises. In this article it is solved by using a special characteristic of the individual Traveling Salesman Problem — the number of changes tracing direction in the search decision tree generated by the Branch and Bound Method. The use of this characteristic allowed to divide individual tasks into three categories, for which, based on experimental data, recommendations of the combined algorithm usage are formulated. Based on the data obtained in a computational experiment (in range from 30 to 45), it is recommended to use a combined algorithm for category III problems starting with $n = 36$, and for category II problems starting with $n = 42$.

Keywords: Traveling Salesman Problem, branch and bound method, precomputed tour, combined algorithm, Lin–Kernighan–Helsgaun algorithm

Acknowledgement: This work was supported by the RFBR grant 18-07-00656.

DOI: 10.17587/it.27.3-8

References

1. **Little J. D. C., Murty K. G., Sweeney D. W., Karel C.** An algorithm for the traveling salesman problem, *Operations Research*, 1963, vol. 11, pp. 972–989.

2. **Goloveshkin V. A., Zhukova G. N., Ulyanov M. V., Fomichev M. I.** Probabilistic Prediction of the Complexity of Traveling Salesman Problems Based on Approximating the Complexity Distribution from Experimental Data, *Automation and Remote Control*, 2018, vol. 79, iss. 7, pp. 1296–1310.

3. **Ulyanov M. V., Fomichev M. I.** Resource characteristics of ways to organize a decision tree in the branch-and-bound method for the traveling salesmen problem, *Business Informatics*, 2015, no. 4(34), pp. 38–46.

4. **Ulyanov M. V., Fomichev M. I.** Approaches to Design Search Decision Tree in the Branch and Bound Method for the Asymmetric Traveling Salesman Problem, *Informacionnie Tekhnologii*, 2018, no. 11, vol. 24, pp. 698–704, DOI: 10.17587/it.24.698-704 (in Russian).

5. **Ulyanov M. V., Fomichev M. I.** Comparative Analysis of the Branch and Bound Method Combinations with Metaheuristic Algorithms for Solving the Asymmetric Traveling Salesman Problem, *Informacionnie Tekhnologii*, 2019, vol. 25, no. 10, pp. 590–595, DOI 10.17587/it.25 (in Russian).

6. **Zhukova G. N., Ulyanov M. V., Fomichev M. A.** Hybrid Exact Algorithm for the Asymmetric Traveling Salesman Problem: Construction and a Statistical Study of Computational Efficiency, *Automation and Remote Control*, 2019, vol. 80, no. 11, pp. 2054–2067, DOI: 10.1134/S0005117919110092

7. **Lin S., Kernighan B. W.** An effective heuristic algorithm for the traveling-salesman problem, *Operations Research*, 1973, vol. 21, no. 2, pp. 498–516.

8. **Helsgaun K.** An effective implementation of the Lin–Kernighan traveling salesman heuristic, *European Journal of Operational Research*, 2000, vol. 126, no. 1, pp. 106–130.

9. **Helsgaun K.** An extension of the Lin–Kernighan–Helsgaun TSP solver for constrained traveling salesman and vehicle routing problems, *Technical Report*, Roskilde, Roskilde University, 2017.

10. **Jonker R., Volgenant T.** Transforming asymmetric into symmetric traveling salesman problems, *Operations Research Letters*, 1983, no. 2, pp. 161–163.

11. **Fomichev M. I.** One Characteristic of the Individual Traveling Salesman Problem, *Tezisy XX Vserossijskoj konferencii molodyh uchonyh po matematicheskomu modelirovaniyu i informacionnym tekhnologiyam. g. Novosibirsk, Rossiya, 28 oktyabrya — 1 noyabrya*, pp. 86–87 (in Russian).

В. Ф. Буй, аспирант, e-mail: phuongbv1991@gmail.com,
С. С. Гаврюшин, д-р техн. наук, проф., e-mail: gss@bmstu.ru,
Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана,
Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук,
В. Б. Фунг, канд. техн. наук, преподаватель, e-mail: phungvanbinh@lqdtu.edu.vn,
Вьетнамский государственный технический университет имени Ле Куй Дона, Ханой, Вьетнам,
Х. М. Данг, канд. техн. наук, преподаватель, e-mail: danghoangminh@iuh.edu.vn,
Индустриальный университет имени Хошимина, Хошимин, Вьетнам,
В. С. Прокопов, канд. техн. наук, доц., e-mail: vprokopov@bmstu.ru,
Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, ООО НТЦ "АПМ"

Автоматизация и управление процессом проектирования главного привода моечной машины нового типа для овощей и фруктов

Излагается новая методика, примененная авторами для автоматизации процесса проектирования главного привода машины нового поколения, которая предназначена для промышленной мойки овощей и фруктов. Для решения задачи многокритериального проектирования предложен оригинальный подход, использующий связанные между собой математические модели, описывающие в едином информационном пространстве динамическое поведение, прочность и функциональные характеристики машины. Обобщенная математическая модель включает 12 управляющих параметров, 16 функциональных ограничений и 3 критерия качества. Для нахождения области Парето-оптимальных решений использовался генетический алгоритм. При выборе окончательного варианта использовался ситуационный подход, позволяющий осуществить выбор рационального решения из множества решений, принадлежащих Парето-оптимальной области. Выполнено сравнение рационального варианта конструкции, найденного с помощью предлагаемого подхода с существующими вариантами изготовления машины. Предлагаемая методика проектирования может быть рекомендована для проектирования широкого спектра аналогичных механических конструкций.

Ключевые слова: автоматизация, многокритериальная оптимизация, математическая модель, принятие решений, кривошипно-шатунный механизм, моечная машина для овощей и фруктов

Введение

Процесс проектирования механизмов и машин всегда рассматривался как ответственный и актуальный этап создания конструкции, обобщающий теоретические и экспериментальные знания в различных областях человеческой деятельности [1, 2]. В соответствии с традиционным подходом [3] процесс проектирования начинается с концептуального проектирования и разработки предварительного дизайна конструкции. На последующих этапах, как правило, проводятся многовариантные расчеты, позволяющие оценить качество проекта и выбрать подходящий вариант изделия (рис. 1). Для рассматриваемых в работе объектов проектирования, представляющих

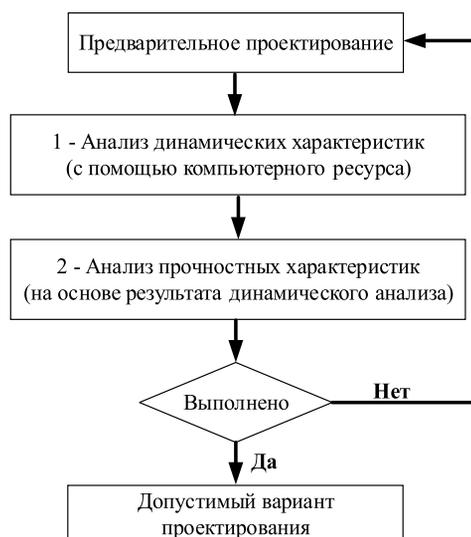


Рис. 1. Традиционный процесс проектирования механизмов

собой механические конструкции, следует особо выделить этапы динамического и структурного анализа и синтеза.

На первом этапе определяются динамические характеристики системы, которые можно рассчитать либо с помощью специального программного обеспечения, либо используя упрощенные математические модели, известные в литературе как *суррогатные модели* (СМ). Большинство проблем инженерного проектирования требуют большого числа экспериментов и (или) моделирования для оценки качества проектируемого изделия. При создании СМ можно предположить, что элементы и детали проектируемой машины являются абсолютно жесткими, и можно ограничиться анализом только кинематических и динамических свойств изделия, не акцентируя внимание на анализе его напряженно-деформированного состояния (НДС). Второй этап сфокусирован на анализе НДС конструкции с использованием граничных и начальных условий, полученных на этапе динамического анализа.

В настоящее время существует специализированное программное обеспечение, позволяющее проводить расчет НДС. При этом нагрузки, действующие на систему, считаются известными. Проектируемая конструкция должна удовлетворять требованиям прочности и соответствовать функциональным критериям. Нагрузки, действующие в рассматриваемом классе механизмов, носят циклический характер с определенной степенью стохастичности и рассматриваются как динамические параметры. Как правило, при проектировании два вышеперечисленных расчетных этапа итерационно уточняются, пока не будут получены результаты, удовлетворяющие предъявляемым требованиям.

Рассмотренный традиционный подход позволяет инженерам проводить оптимизацию изделия, используя две СМ. Однако то обстоятельство, что модели принадлежат различным информационным пространствам и анализируются на двух разных этапах проектирования, существенно усложняет процесс поиска решения. Например, оптимизация динамической реакции и требуемой мощности двигателя на этапе 1 [4] может привести к нарушению условий прочности деталей на этапе 2.

В данной работе предлагается новый подход к решению задачи многокритериального проектирования механизмов циклического действия. Эффективность предложенного подхода подтверждена на практике при проектировании главного привода моечной машины нового типа для овощей и фруктов. Конструкция механизма разработана с уче-

том требований технологического производства. При проектировании геометрические и физико-механические параметры элементов механизма рассматриваются в качестве управляющих параметров, что позволило создать расчетную модель изделия в едином информационном пространстве с ее кинематическими, динамическими и прочностными характеристиками. Созданная обобщенная математическая модель (ОММ) нацелена на применение многокритериальных методов оптимизации в рамках современных алгоритмов принятия решений, необходимых для экспертной оценки качества изделия, проводимой лицом, принимающим решение.

1. Применение многокритериального подхода при проектировании системы главного привода моечной машины

Разработанная методика была применена в процессе проектирования главного привода моечной машины [5]. Главным приводом машины является кривошипно-шатунный механизм (КШМ), который обеспечивает необходимые для мойки овощей и плодов колебания в горизонтальной плоскости (рис. 2, см. третью сторону обложки). Одной из важных проблем, связанных с применением КШМ, является наличие динамических реакций, вызывающих вибрации системы и снижающих усталостную прочность деталей [6, 7]. В целях снижения динамических реакций было предложено дополнить КШМ системой демпфирующих пружин (КШМ-П). Необходимо отметить, что задача проектирования системы главного привода, которая включает в себя динамические и прочностные ограничения, является задачей многокритериальной оптимизации.

Процесс многокритериального проектирования механизмов, устраняющий перечисленные ограничения традиционного метода, представлен на рис. 3.

Следует отметить, что важнейшим элементом нового подхода является наличие ОММ. В рамках концепции единого информационного пространства оптимизация конструкции осуществляется в соответствии с рядом динамических и прочностных критериев и ограничений. Иллюстрация ОММ системы КШМ-П показана на рис. 4 (см. четвертую сторону обложки).

Используемая ОММ позволяет по задаваемому вектору управляющих параметров с учетом ограничений автоматически вычислять все критерии качества (рис. 5, см. четвертую сторону обложки). Функциональные ограниче-

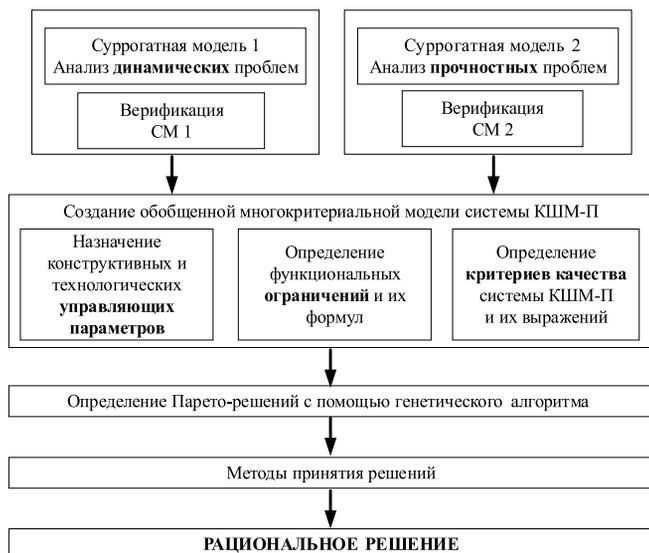


Рис. 3. Процедура многокритериального проектирования КШМ-П на основе использования ОММ

ния являются своего рода фильтрами для отсекаания недопустимых решений, находящихся в пространстве критериев качества. Процесс нахождения минимальных значений критериев качества в созданной математической модели реализован с помощью методов оптимизации [8]. Одним из известных методов оптимизации является генетический алгоритм (genetic algorithm, ГА). Основная идея ГА заключается в использовании двух механизмов: генетического наследования (population) и естественного отбора (selection). При этом сохраняется биологическая терминология в упрощенном виде и основные понятия линейной алгебры [9–11].

ГА позволяет определить Парето-оптимальное решение, но возникает вопрос: какова должна быть стратегия поиска для получения рациональных решений, удовлетворяющих требованиям всех экспертов? Ответ на этот вопрос дают методы оптимального управления [12]. На следующем шаге применяются методы принятия решений для выбора рациональных вариантов проектирования на основе множества Парето-решений. В зависимости от конкретных производственных условий можно использовать различные методы принятия решений: метод последовательных уступок, метод главных критериев и др. [13–15].

2. Обобщенная математическая модель главного привода мочной машины

Динамические и кинематические характеристики системы КШМ-П под действием внешних сил F (рис. 6) были изучены с помощью

аналитических выражений, которые представлены в работах [16, 17]. Динамические характеристики, такие как требуемая мощность (P) и динамическая реакция (R_x), являются важными факторами для обеспечения стабильной работы системы и зависят от времени [4].

Для создания математической модели необходимо выбрать набор параметров, которые управляют процессом вычисления СМ в едином информационном пространстве. В нашем случае были выбраны размеры кривошипа, шатуна и жесткость пружины (рис. 7).

Значения массы, положения центра тяжести, момента инерции частей [18] выражаются через векторы управляющих параметров, обозначенные $x = (x_1, \dots, x_{12})$ (табл. 1). На основе технического анализа и экспериментальных данных, накопленных экспертами при оценке процесса проектирования и испытаний мочной машины, назначены управляющие параметры главного привода и диапазоны их значений.

СМ позволяет получить выражения для ограничений в ОММ. Для достижения оптимальной конструкции должны одновременно соблюдаться прочностные условия (срез, смятие, растяжения—сжатия...), условия устойчивости, усталости кривошипа, а также шатуна.

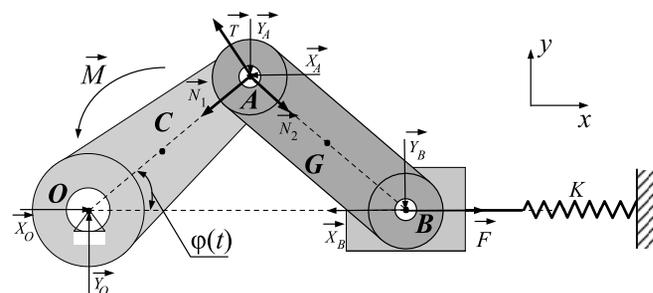


Рис. 6. Расчетная модель системы КШМ-П:

$X_{O/A/B}$, $Y_{O/A/B}$ — составляющие динамических реакций в парах O , A , B по координатным осям, совпадающим с положительным направлением координатных осей x , y , соответственно; N_1 , N_2 — сжимающие нагрузки в паре A кривошипа и шатуна, соответственно; $\varphi(t)$ — угол поворота; M — крутящий момент двигателя

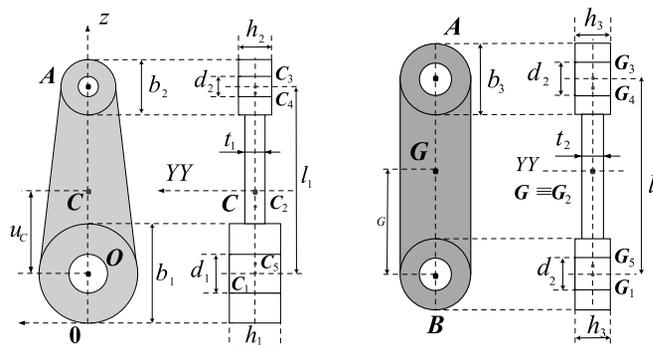


Рис. 7. Геометрические параметры, используемые в ОММ

Таблица 1

Управляющие параметры

Обозначение	Исходное обозначение	Минимальное значение	Максимальное значение	Единица измерения	Описание
x_1	t_1	3	30	мм	Толщина кривошипа
x_2	t_2	3	30	мм	Толщина шатуна
x_3	K	0	1000	Н/м	Жесткость пружины
x_4	b_1	30	100	мм	Ширина нижней головки кривошипа
x_5	b_2	30	100	мм	Ширина верхней головки кривошипа
x_6	b_3	30	100	мм	Ширина шатуна
x_7	d_1	6	60	мм	Диаметр большего вкладыша кривошипа
x_8	d_2	9	55	мм	Диаметр малого вкладыша кривошипа
x_9	h_1	6	30	мм	Толщина большего вкладыша кривошипа
x_{10}	h_2	6	30	мм	Толщина малого вкладыша кривошипа
x_{11}	h_3	6	30	мм	Толщина вкладыша шатуна
x_{12}	t	0	$\frac{2\pi}{\omega}$	с	Расчетное время (динамика)

Математическая модель главного привода моечной машины создана на основе синтеза различных требований к конструкции КШМ-П. Она состоит из 12 управляющих параметров (табл. 1), 16 функциональных ограничений (табл. 2) и 3 критериев качества (табл. 3). Методы расчета функциональных ограничений, критериев качества и процесс верификации СМ подробно описаны в работе [19].

3. Автоматизация и управление процессом проектирования главного привода моечной машины нового типа для овощей и фруктов

В этом разделе приведены результаты проектирования главного привода моечной машины, полученные с использованием ОММ. Получена Парето-область с помощью генетического алгоритма. Затем представлен процесс выбора рациональных решений, удовлетво-

Таблица 2

Функциональные ограничения

Ограничение	Описание
$f_1 = \frac{1}{10} - \frac{t_1}{b(z)} \leq 0$	Ограничение толщины кривошипа [20] $b_2 < b(z) < b_1$
$f_2 = n_{stab} - \frac{P_{cr1}}{N_{1max}} \leq 0$	Условие устойчивости кривошипа: n_{stab} — запас устойчивости; P_{cr1} — критическая сжимающая нагрузка для кривошипа
$f_3 = n_{stab} - \frac{P_{cr2}}{N_{2max}} \leq 0$	Условие устойчивости шатуна: n_{stab} — запас устойчивости; P_{cr2} — критическая сжимающая нагрузка для шатуна
$f_4 = n_{fatig} - \frac{\sigma_{-1}}{k_1\sigma_\alpha + \alpha_\sigma\sigma_m} \leq 0$	Условие усталостной прочности кривошипа: n_{fatig} — запас усталости; σ_{-1} — предел усталости материала КШМ; k_1 — коэффициент, учитывающий влияние других факторов на циклическую прочность кривошипа; α_σ — коэффициент, характеризующий чувствительность материала к асимметрии цикла; σ_α — амплитудное напряжение кривошипа; σ_m — среднее напряжение кривошипа
$f_5 = n_{fatig} - \frac{\sigma_{-1}}{k\sigma_{2max}} \leq 0$	Условие усталостной прочности шатуна: k — коэффициент, учитывающий влияние других факторов на циклическую прочность шатуна; σ_{2max} — максимальное напряжение шатуна
$f_6 = n_{cut} - \frac{\tau_{cut}}{\tau_{1max}} \leq 0$	Условие прочности на срез верхней головки кривошипа: n_{cut} — запас прочности на срез; τ_{cut} , τ_{1max} — предельное и максимальное напряжение на срез кривошипа
$f_7 = \frac{2(M + Tl_1)}{d_1h_1(h_1 - t_{1t})} \leq \sigma_{ш}$	Прочность на смятие шпонки: h_r , t_{1t} — размеры шпонки
$f_8 = \frac{2(M + Tl_1)}{d_1h_1b_t} \leq \tau_{cut}$	Прочность на срез шпонки: b_t — размер шпонки
$f_9 = \frac{\sqrt{XO^2 + YO^2}}{(b_1 - d_1)h_1} \leq \tau_{cut}$	Прочность на срез нижней головки кривошипа
$f_{10} = \frac{\sqrt{XA^2 + YA^2}}{(b_1 - D_2)h_2} \leq \tau_{cut}$	Прочность на срез подшипника: D_2 — размер подшипника
$f_{11} = b_1 \geq d_1 + 0,005$ $f_{12} = b_2 \geq D_2$ $f_{13} = b_2 \geq d_2 + 0,005$ $f_{14} = b_3 \geq d_2 + 0,005$ $f_{15} = 2h_2 - t_1 - t_2 \geq 0,001$ $f_{14} = b_1 - b_2 \geq 0,02$ $f_{16} = h_1 - t_1 \geq 0,001$	Дополнительные технологические ограничения (геометрические характеристики)

Таблица 3

Критерии качества

Обозначение	Единица измерения	Описание
$\Phi_1 = \max(M(t)\omega(t)) \rightarrow \min$	Вт	Требуемая мощность ротора
$\Phi_2 = m_1 + m_2 \rightarrow \min$	кг	Масса КШМ
$\Phi_3 = \max(\sqrt{X_{O}^2(t) + Y_{O}^2(t)}) \rightarrow \min$	Н	Динамическая реакция (фактор, вызывающий вибрацию)

ряющих требованиям экспертов. Проведено сравнение согласованных и оптимальных вариантов с решением, полученным с помощью традиционного метода проектирования.

3.1. Парето-оптимальное решение

В табл. 4 (в сокращенном виде) и на рис. 8 соответственно представлены 73 оптимальных решения (вектор управляющих параметров x , значения критериев качества Φ) и область Парето-оптимальных решений. По табл. 4 можно выбирать конкретные варианты проектирования системы КШМ-П для производства моечной машины.

3.2. Стратегии принятия решений

В реальном производстве требования клиента являются наиболее важными, и производителю надо стремиться выполнить эти требования. Для конкретного производственного условия в зависимости от потребностей клиента порядок приоритетов критериев качества может варьироваться. В данной работе рассматриваемыми критериями качества являются

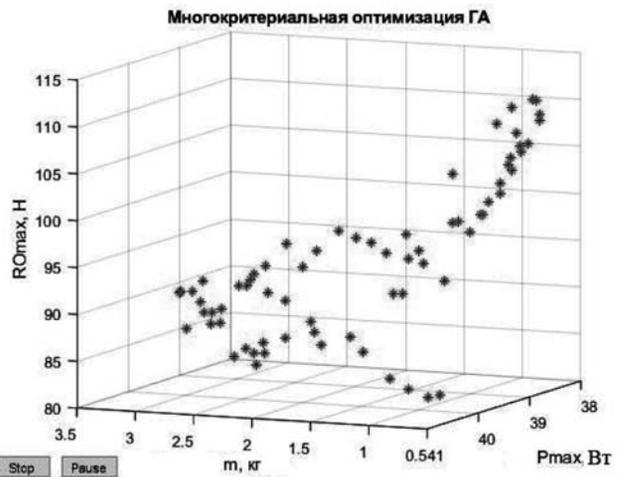


Рис. 8. Область оптимального Парето-решения с использованием методом ГА

мощность двигателя, масса и динамическая реакция. В некоторых конкретных условиях масса является наиболее важным критерием, в других случаях энергетическое требование ставится на первое место, а иногда клиенты предъявляют высокие требования к снижению шума и вибрации. В каждой из этих ситуаций, когда порядок приоритетов критериев различен, можно получить разные оптимальные решения, удовлетворяющие требованиям экспертов, участвующих в процессе проектирования. Чтобы проиллюстрировать вышесказанное, использованы два метода принятия решений (метод последовательных уступок и метод главных критериев) для выбора рациональных вариантов проектирования из Парето-области.

3.2.1. Метод последовательных уступок

На основе 73 найденных решений и в соответствии с требованиями экспертов инже-

Таблица 4

Набор управляющих параметров и значений соответствующих критериев качества

№	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	Φ_1	Φ_2	Φ_3
1	17,64	17,68	570,2	84,09	57,78	60,79	48,25	25	25,06	25,90	27,99	39,521	3,483	83,587
2	11,80	16,57	676,8	71,47	51,37	50,62	50,57	30	21,97	21,11	24,15	39,083	2,067	97,194
3	11,71	16,55	702,1	71,24	51,12	50,98	50,23	30	21,80	22,24	24,18	39,039	2,084	99,663
4	17,43	17,41	571,0	77,86	53,67	64,91	48,64	25	24,07	25,28	25,41	39,547	3,301	83,783
5	17,56	17,56	570,9	83,19	57,05	61,26	48,17	25	24,68	25,75	27,79	39,523	3,443	83,697
...														
70	17,25	17,13	580,8	78,61	54,60	53,09	48,84	30	23,95	24,22	25,68	39,328	2,650	86,562
71	11,80	16,57	677,8	71,47	51,37	50,62	50,57	30	21,97	21,11	24,15	39,081	2,067	97,294
72	16,83	16,91	572,9	80,16	55,32	54,58	49,14	25	24,24	24,88	26,80	39,391	2,911	85,098
73	13,16	16,76	649,0	72,28	53,03	50,84	50,10	30	23,18	21,44	24,81	39,145	2,199	94,164

нер-конструктор выбирает порог для наиболее важного критерия, например Φ_1 , с обозначением $[\Phi_1]$. С порогом $[\Phi_1]$ можно получить n_1 решений ($n_1 < 73$). Затем инженер-конструктор устанавливает второй порог $[\Phi_2]$ для второго по важности критерия (Φ_2) и получает n_2 решений ($n_2 < n_1$). В данном наборе n_2 решений выбирается решение, в котором третий критерий является наилучшим. При изменении порядка приоритетов критериев качества можно получить разные варианты проектирования, например:

- для порядка приоритетов $\{\Phi_1 \mapsto \Phi_2 \mapsto \Phi_3\}$ получено решение S_1 (табл. 5);
- для порядка приоритетов $\{\Phi_2 \mapsto \Phi_1 \mapsto \Phi_3\}$ получено решение S_2 (табл. 6);
- для порядка приоритетов $\{\Phi_3 \mapsto \Phi_2 \mapsto \Phi_1\}$ получено решение S_3 (табл. 7).

3.2.2. Метод главных критериев

При использовании данного метода с учетом каждого из трех критериев получены три решения:

- если Φ_1 является самым важным критерием, получено решение S_4 (табл. 8);
- если Φ_2 является самым важным критерием, получено решение S_5 (табл. 9);
- если Φ_3 является самым важным критерием, получено решение S_6 (табл. 10).

3.3. Анализ и сравнение результатов

В этом разделе представлены результаты, полученные двумя методами проектирования главного привода моечной машины. С помо-

Таблица 5

Решение S_1

№	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	Φ_1	Φ_2	Φ_3
38	16,24	9,45	618,5	79,74	48,94	43,59	41,43	25	20,37	24,85	18,84	39,067	1,894	92,391

Таблица 6

Решение S_2

№	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	Φ_1	Φ_2	Φ_3
25	17,22	6,50	592,4	88,58	48,66	44,72	28,76	25	22,76	24,32	15,80	39,224	2,148	90,145

Таблица 7

Решение S_3

№	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	Φ_1	Φ_2	Φ_3
17	11,71	16,55	702,1	71,24	51,12	50,98	50,23	30	21,80	22,24	24,18	39,039	2,084	99,663

Таблица 8

Решение S_4

№	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	Φ_1	Φ_2	Φ_3
6	17,74	7,44	636,3	84,58	55,07	48,11	43,65	25	23,67	26,48	14,92	38,962	2,186	93,738

Таблица 9

Решение S_5

№	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	Φ_1	Φ_2	Φ_3
58	15,12	7,65	627,0	66,69	44,13	50,25	35,90	17	25,18	25,37	10,20	39,011	1,713	93,523

Таблица 10

Решение S_6

№	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	Φ_1	Φ_2	Φ_3
66	13,47	6,43	532,2	94,98	64,95	49,96	43,06	30	24,60	25,59	17,87	39,603	2,521	83,059

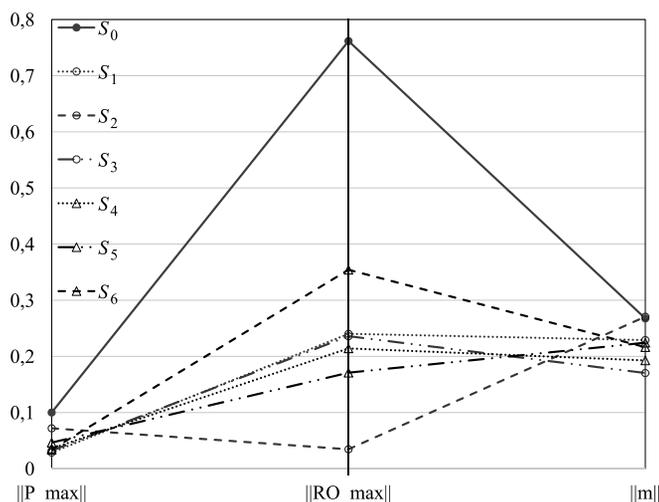


Рис. 9. Визуальное распределение 6 решений с использованием предложенного метода (S_1, \dots, S_6) и традиционного метода (S_0)

стью традиционного метода в ходе итерационного процесса выбирается допустимое решение, соответствующее решению S_0 . Результаты, полученные с помощью предложенного нового подхода, соответствуют вышеуказанными решениями $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$.

Для удобства сравнения решений (рис. 9) критерии качества нормируются по формуле

$$\|\Phi\| = \frac{\Phi - \min \Phi}{\max \Phi - \min \Phi},$$

где реальное значение критерия Φ находится в диапазоне значений $\Phi = [\min \Phi, \max \Phi]$, а критерий $\|\Phi\|$ нормирован и находится в диапазоне: $\|\Phi\| = [0, 1]$

Более подробные параметры для сравнения эффективности методов проектирования приведены в табл. 11.

По сравнению с результатом проектирования традиционным методом (S_0) видно, что:

- большинство решений, полученных с помощью нового подхода, дают лучшие резуль-

таты по всем критериям, кроме решения S_6 (Φ_2 хуже на 0.97 %);

- метод главных критериев позволяет легко выбрать наилучшее значение одного критерия, но не имеет способа контролировать другие критерии. Это в результате приводит к достижению другими критериями нежелательных значений (например, решение S_6). Однако метод последовательных уступок позволяет контролировать пороговые значения критериев, чтобы получить оптимальные согласованные варианты проектирования (S_1, S_2, S_3);
- с помощью предлагаемого подхода процесс проектирования главного привода моечной машины нового типа для овощей и фруктов становится более гибким и эффективным. Данный подход позволяет инженерам автоматизировать выбор разных решений (S_1, \dots, S_6) в зависимости от конкретных производственных условий.

Решениям S_0, S_1, S_2, S_3 соответствуют различные конфигурации конструкции КШМ, как показано на рис. 10. Один из вариантов S_1, S_2, S_3 будет использоваться для улучшения главного привода моечной машины.

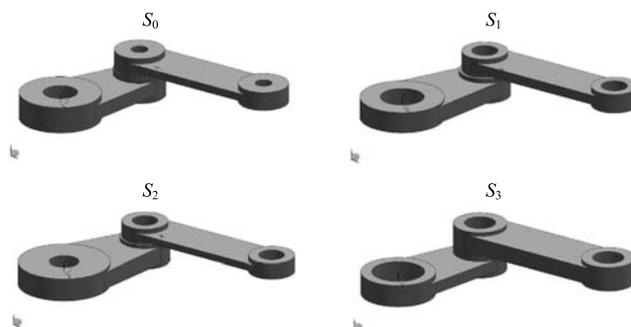


Рис. 10. Конфигурации КШМ:

S_0 — традиционный подход; S_1, S_2, S_3 — новый подход с использованием метода последовательных уступок

Таблица 11

Сравнение эффективности методов проектирования

Критерий	S_0	Метод последовательных уступок			Метод главных критериев		
		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
Φ_1 , Вт	40,022	39,067	39,224	39,040	38,962	39,011	39,604
Сравнение Φ_1 , %		-2,39 %	-1,99 %	-2,45 %	-2,65 %	-2,53 %	-1,05 %
Φ_2 , кг	2,497	1,894	2,148	2,084	2,186	1,713	2,521
Сравнение Φ_2 , %		-24,14 %	-13,98 %	-16,53 %	-12,45 %	-31,39 %	+ 0,97 %
Φ_3 , Н	120,825	92,391	90,145	99,663	93,738	93,523	83,059
Сравнение Φ_3 , %		-23,53 %	-25,39 %	-17,51 %	-31,26 %	-22,60 %	-31,26 %

Заключение

В работе предложен новый подход, позволяющий существенно снизить трудоемкость и повысить эффективность процесса проектирования главного привода моечной машины для овощей и фруктов. Для устранения ограничений, присущих традиционным методам проектирования, создана ОММ изделия, включающая две СМ конструкции, условно называемые динамической и прочностной моделями. С использованием ГА на основе построенной математической модели были найдены 73 Парето-оптимальных решения. С учетом производственных условий, используя методы последовательных уступок и главных критериев, из полученных Парето-оптимальных решений были отобраны шесть рациональных решений. Все найденные решения обеспечили существенное улучшение качества моечной машины по сравнению с существующими конструкциями, разработанными с использованием традиционных методов проектирования. Результаты показывают, что предлагаемый подход может быть рекомендован для проектирования машин циклического действия, а также для автоматизации и управления процессом проектирования широкого спектра механических систем в целях повышения качества продукции.

Список литературы

1. **Yildirim Hurmuzlu, Osita D. I. Nwokah.** The Mechanical Systems Design Handbook: Modeling, Measurement, and Control. New York: CRC Press, 2017.
2. **Richard Budynas, Keith Nisbett.** Shigley's Mechanical Engineering Design. United States: McGraw-Hill Education, 2014.
3. **Буй В. Ф., Гаврюшин С. С., Фунг В. Б., Данг Х. М., Прокопов В. С.** Динамический и прочностной анализ системы главного привода при проектировании моечной машины нового типа для овощей и фруктов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2020. Т. 4, № 100.
4. **Nguyen T. T. Nga, Dang H. Minh, Nguyen T. M. Hanh, Phung V. Binh, Bui V. Phuong, Duc V. N.** Dynamic Analysis and Multi-Objective Optimization of Slider-Crank Mechanism for an Innovative Fruit and Vegetable Washer // Journal of Mechanical Engineering Research & Developments. 2020. Vol. 43, N. 2. P. 127–143.
5. **Dang H. M., Phung V.B, Nguyen V. D., Tran T. T.** Multi-functional fruit and vegetable washer. Vietnamese Patent Application VN 2019324A2 (In submission).

6. **Яманин А. И., Жуков В. А., Барышников С. О.** Силовой анализ поршневого двигателя с использованием динамических моделей кривошипно-шатунного механизма // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2018. № 1. С. 191–200.
7. **Tian Q., Flores P., Lankarani H. M.** A comprehensive survey of the analytical, numerical and experimental methodologies for dynamics of multibody mechanical systems with clearance or imperfect joints // Mechanism and Machine Theory. 2018. N. 122. P. 1–57.
8. **Васильев Ф. П.** Методы оптимизации. М.: МЦНМО, 2011.
9. **Панченко Т. В.** Генетические алгоритмы: учебно-методическое пособие. Астрахань: Издательский дом "Астраханский университет", 2007.
10. **Affi Z., Badreddine E. L., Romdhane L.** Advanced mechatronic design using a multi-objective genetic algorithm optimization of a motor-driven four-bar system // Mechatronics. 2007. Vol. 17, N. 9. P. 489–500.
11. **Галемов Р. Т., Масальский Г. Б.** Комбинированный поисковой метод решения обратной задачи кинематики многозвенного манипулятора // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 7. С. 464–473.
12. **Брайсон А., Ю-Ши Хо.** Прикладная теория оптимального управления. М.: Мир, 1972.
13. **Лебедев Ю. В., Кокарев К. В.** Решение многокритериальных задач в недропользовании методом последовательных уступок // Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений. сб. докл. конф. Екатеринбург: УГГУ, 2016. С. 133–136.
14. **Бродецкий Г. Л., Гусев Д. А., Мазунина О. А., Фель А. В.** Возможности метода последовательных уступок при выборе решения по многим критериям // Логистика и управление цепями поставок. 2017. № 3. С. 91–105.
15. **Салеев Д. В.** Анализ методов многокритериальной оптимизации, применяемых при управлении технологическими процессами // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2013. № 2. С. 11.
16. **Dang H. M., Bui V. P., Nguyen V. D., Phung V. B.** Dynamic analysis and parametric optimization of an innovative fruit vegetable washer // First National Symposium on Dynamics and Control. Viet Nam. 2019. P. 250–254.
17. **Буй В. Ф., Гаврюшин С. С., Фунг В. Б., Данг Х. М., Прокопов В. С.** Динамический анализ кривошипно-ползунного механизма с пружиной, применяющегося в моечной машине нового типа для овощей и фруктов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2020. Вып. 2. С. 51–52.
18. **Фаворин М. В.** Моменты инерции тел. Справочник. М.: Машиностроение, 1977.
19. **Буй В. Ф., Гаврюшин С. С., Фунг В. Б., Данг Х. М., Данг В. Т.** Обобщенная математическая модель кривошипно-шатунного механизма с пружиной, применяющегося в моечной машине нового типа для овощей и фруктов // Тез. докл. XXVI международного симпозиума им. А. Г. Горшкова. Кременки. 2020. С. 75–77.
20. **Vlasov V. Z.** Thin-walled elastic beams, office of technical services. US Department of Commerce, Washington, DC, 1961.

V. P. Bui, Postgraduate, e-mail: phuongbv1991@gmail.com, S. S. Gavruishin, Professor, e-mail: gss@bmstu.ru, Bauman Moscow State Technical University, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, V. B. Phung, PhD, e-mail: phungvanbinh@lqdtu.edu.vn, Le Quy Don State Technical University, Hanoi, Viet Nam, H. M. Dang, PhD, e-mail: danghoangminh@iuh.edu.vn, Industrial University of Ho Chi Minh City, Ho Chi Minh, Viet Nam, V. S. Prokopov, PhD, e-mail: vprokopov@bmstu.ru, Bauman Moscow State Technical University, Research and Software Development Centre "APM", Moscow, Russian Federation

Automation and Management of Design Process of the Main Drive for an Innovative Fruits and Vegetables Washer

A new technique is described, used by the authors to automate the design process of the main drive of a new generation machine intended for industrial washing of fruits and vegetables. To solve the problem of multi-criteria design, the original approach is proposed that uses interconnected mathematical models describing the dynamic behavior, strength reliability and functional characteristics of the machine in a unified information space. The generalized mathematical model includes 12 controlled parameters, 16 functional constraints, and 3 quality criteria. A genetic algorithm was used to find the space of Pareto-optimal solutions. The situational approach was used to select the final rational solution from a set of solutions belonging to the Pareto-optimal domain. The rational design of option the washer found using the proposed approach is compared with the existing ones. The proposed design methodology can be recommended for the design of a wide range of similar mechanical structures.

Keywords: automation, multi-criteria optimization, decision making, generalized mathematical model, slider-crank mechanism, fruits and vegetables washer

DOI: 10.17587/it.27.9-17

References

1. Yildirim Hurmuzlu, Osita D. I. Nwokah. The Mechanical Systems Design Handbook: Modeling, Measurement, and Control, New York, CRC Press, 2017.
2. Richard Budynas, Keith Nisbett. Shigley's Mechanical Engineering Design, United States, McGraw-Hill Education, 2014.
3. Bui V. P., Gavruishin S. S., Phung V. B., Dang H. M., Prokopov V. S. Dynamic and structural analysis of the main drive system in design process of an innovative fruit-vegetable washer, *Inzhenernui Zhurnal: nayka i innovashii*, 2020, vol. 4, iss. 100 (in Russian).
4. Nguyen T. T. Nga, Dang H. Minh, Nguyen T. M. Hanh, Phung V. Binh, Bui V. Phuong, Duc V. N. Dynamic Analysis and Multi-Objective Optimization of Slider-Crank Mechanism for an Innovative Fruit and Vegetable Washer, *Journal of Mechanical Engineering Research & Developments*, 2020, vol. 43, no. 2, pp. 127–143.
5. Dang H. M., Phung V. B., Nguyen V. D., Tran T. T. Multifunctional fruit and vegetable washer, Vietnamese Patent Application VN 2019324A2 (In submission).
6. Yamanin A. I., Zhukov V. A., Baryshnikov S. O. Power analysis of a piston engine using dynamic models of a crank mechanism, *Vestnik Goshudarstvennogo Universiteta morskovo i rechnovo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2018, no. 1, pp. 191–200 (in Russian).
7. Tian Q., Flores P., Lankarani H. M. A comprehensive survey of the analytical, numerical and experimental methodologies for dynamics of multibody mechanical systems with clearance or imperfect joints, *Mechanism and Machine Theory*, 2018, no. 122, pp. 1–57.
8. Vasiliev F. P. Method optimization, Moscow, MSNMO, 2011 (in Russian).
9. Panchenko T. V. Genetic algorithm: A Training Manual, Astrakhan, Izdatelski dom "Astrakhanskii universitet", 2007 (in Russian).
10. Affi Z., Badreddine E. L., Romdhane L. Advanced mechatronic design using a multi-objective genetic algorithm optimization of a motor-driven four-bar system, *Mechatronics*, 2007, vol. 17, no. 9, pp. 489–500.
11. Galemov R. T., Masalsky G. B. Combined search method for solving the inverse kinematics problem of a multi-link manipulator, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 7, pp. 464–473 (in Russian).
12. Bryson A., Yu-Shi Ho. Applied Optimal Control Theory, Moscow, Mir, 1972 (in Russian).
13. Lebedev Yu. V., Kokarev K. V. The solution of multicriteria problems in subsoil use by the method of successive concessions, *Innovatsionnye geotekhnologii pri razrabotke rudnik i nerudnik mestorozhdenii. Sb. Dokl. Konf. Ekaterinburg*, UGGU, 2016, pp. 133–136 (in Russian).
14. Brodetsky G. L., Gusev D. A., Mazunina O. A., Fel A. V. The possibilities of the method of successive concessions when choosing a solution according to many criteria, *Logistika i upravlenye sepyami postavok*, 2017, no. 3, pp. 91–105 (in Russian).
15. Saleev D. V. Analysis of multicriteria optimization methods used in process control, *Modelirovaniye, optimizatsii i informatsionnue tekhnologii*, 2013, no. 2, pp. 11 (in Russian).
16. Dang H. M., Bui V. P., Nguyen V. D., Phung V. B. Dynamic analysis and parametric optimization of an innovative fruit vegetable washer, *First National Symposium on Dynamics and Control*, Viet Nam, 2019, pp. 250–254.
17. Bui V. P., Gavruishin S. S., Phung V. B., Dang H. M., Prokopov V. S. Dynamic analysis of slider-crank mechanism connected spring system and application for an innovative fruit and vegetable washer, *Inzhenernyi zhurnal: nayka i innovashii*, 2020, no. 2, pp. 51–52 (in Russian).
18. Favorin M. V. Moments of inertia tel. Directory, Moscow, Mashinostroeniye, 1977 (in Russian).
19. Bui V. P., Gavruishin S. S., Phung V. B., Dang H. M., Dang V. T. Generalized mathematical model of a crank mechanism with a spring used in a new type washing machine for fruits and vegetables, *Tez. Dokl. XXVI mezhdunarodnogo simposiuma im. A. G. Gorshkova. Kremenki*, 2020, pp. 75–77 (in Russian).
20. Vlasov VZ. Thin-walled elastic beams, office of technical services, US Department of Commerce, Washington, DC, 1961.

Н. А. Игнатъев, д-р физ.-мат. наук, проф., e-mail: ignitev@rambler.ru,
М. Я. Лолаев, преподаватель, e-mail: musulmon.lolayev.94@mail.ru,
Национальный университет Узбекистана, г. Ташкент

Анализ соответствия структур отношений объектов классов на многообразиях их описаний

Рассматривается синтез латентных признаков в целях снижения размерности пространства для описания объектов непересекающихся классов. Латентные признаки синтезируются на данных, полученных как результат предобработки значений исходных признаков. Исследуется соответствие структур отношений объектов на плоскости по результатам предобработки и группировки данных. Предложена мера соответствия двух структур отношений объектов в разных признаковых пространствах.

Ключевые слова: предобработка данных, метод главных компонент, мера соответствия, снижение размерности

Введение

Рассматривается анализ соответствия структур отношений на многообразиях их описаний в задачах снижения размерности признакового пространства. В работе [1] выделены следующие типовые прикладные задачи снижения размерности:

- отбор наиболее информативных признаков (включая латентные);
- сжатие массивов обрабатываемой и хранимой информации;
- визуализация (наглядное представление) данных;
- построение условных координатных осей (многомерное шкалирование, латентно-структурный анализ).

Существуют несколько постановок задачи выбора пространства из латентных признаков для описания объектов. Одним из существенных различий между ними является наличие или отсутствие классификации объектов. Метод главных компонент (РСА) принадлежит к числу наиболее часто используемых при анализе данных [1]. Например, на основе РСА разработан метод локальной геометрии [2] для поиска скрытых закономерностей в данных. Линейное отображение описаний объектов на плоскость позволило экспертам визуально исследовать структуру отношений между ними.

Искажение структуры данных при проецировании в пространство меньшей размерности связано с изменением отношений близости между объектами [3]. Были предложены два способа для сравнения структур данных до и после проецирования их на двумерную плоскость.

Для сравнения первым способом в каждой точке на плоскости вычисляется множество K_1 ближайших к данной точке соседних точек в исходном пространстве и множество K_2 ближайших соседей в двумерном пространстве после проецирования. Мерой сохранения отношений соседства между точками данных после их проецирования служит мощность пересечения K_1 и K_2 (число совпадающих точек).

Второй способ для анализа соответствия структур отношений объектов в разных признаковых пространствах использует нейронные сети. Отношение соседства определяется по узлам сетки в самоорганизующих картах Кохонена в исходном признаковом пространстве и пространстве меньшей размерности. Узлы сетки образуют прямоугольную или гексагональную структуру.

К недостаткам двух приведенных выше способов для анализа структур отношений из работы [3] можно отнести следующие:

- при выборе меры расстояния для сравнения объектов не учитываются масштабы измерений признаков;

— не определены правила выбора числа ближайших соседей K_1 и K_2 для вычисления меры сохранения отношений соседства;

— нет четких, обоснованных рекомендаций по выбору узлов сетки для самоорганизующих карт Кохонена.

Существенное значение для формирования структуры отношений между объектами имеет выбор способа нормирования данных. Одной из целей нормирования является инвариантность к масштабам измерений признаков. Свойство инвариантности расширяет возможности для обнаружения скрытых закономерностей, характерных для всех выборок данных из генеральной совокупности.

Важным показателем для анализа данных является оценка компактности объектов классов. Единой меры компактности не существует [4]. Различаются вычисления мер компактности в зависимости от размерности данных. Экстремум критерия для разбиения значений признака на непересекающиеся интервалы из работы [5] может рассматриваться как мера компактности, инвариантная к масштабам измерения. Перечень факторов, от которых зависит структура отношений объектов при размерности пространства, большей либо равной 2, приводится в работе [6].

Применение методов анализа данных без каких-либо предположений о природе их среды рассматривается как средство обнаружения скрытых закономерностей в слабо структурированных предметных областях. Исследование отличия истинных параметров среды от полученных на основе предположений проводится в целях повышения адекватности описания реальных процессов и явлений в рамках математических моделей. В работе [7] показано, что порог линейной решающей функции, вычисленный по экстремуму критерия разбиения признаков на непересекающиеся интервалы [5], отличается от порога, вычисляемого при предположении о нормальном распределении данных в линейном дискриминанте Фишера.

Синтез латентных признаков может проводиться как по одному набору признаков, так и по разным. Например, в работе [8] каждый латентный признак формируется по правилам иерархической агломеративной группировки по "своему" набору исходных признаков. Результаты использования метода главных компонент являются примером синтеза латентных признаков из одного набора.

Для решения ряда задач выбора латентного признакового пространства существуют доступные для использования инструментальные

средства. К таковым можно отнести функции из библиотеки языка PYTHON [9]. Для оценки структуры отношений объектов в латентном признаковом пространстве рекомендуется использовать меру компактности объектов классов из работы [6].

Значения латентных признаков зависят от предобработки данных в исходном признаковом пространстве. Эта зависимость отражается на структуре отношений объектов в латентном признаковом пространстве. Требуется разработка мер соответствия структур отношений, при формировании которых применялись разные способы предобработки. Меры соответствия структур могут быть востребованы при безпризнаковом распознавании, например, при использовании метода Саймона [10] для визуализации объектов в R^2 по матрице их парных расстояний.

В данной работе визуализация проводится в целях:

— анализа соответствия структур отношений объектов в проекциях на плоскость при разных способах предобработки исходных данных;

— выбора представления данных в пространстве меньшей размерности со значением меры компактности объектов классов больше, чем в исходном.

Поиск подходящей размерности пространства для процедуры проецирования в пространство более низкой размерности на основе меры компактности объектов классов предлагается проводить по упорядоченной последовательности наборов исходных (сырых) признаков. Последовательность наборов [11] формируется по значениям отношений внутриклассового сходства и межклассового различия признаков.

1. Постановка задачи

Рассматривается множество $E_0 = \{S_1, \dots, S_m\}$ объектов, разделенное на два непересекающихся подмножества (класса) K_1 и K_2 . Описание объектов проводится с помощью набора из n количественных признаков $X(n) = (x_1, \dots, x_n)$. На $X(h) \subset X(n)$, $2 \leq h \leq n$, определены операторы A_1, \dots, A_μ , $\mu \geq 2$, для предобработки данных с сохранением размерности признакового пространства. Для снижения размерности признакового пространства описания объектов E_0 из $X(h)$ отображаются в R^2 . Исследуется зависимость топологии объектов в R^2 от применения операторов $\{A_i\}$, $i = 1, \dots, \mu$.

Компактность объектов классов определяется через структуру их отношений в призна-

ковом пространстве по заданной мере расстояния. Для оценки компактности предлагается использовать отношение связанности объектов по множеству граничных объектов классов.

Считается, что задана метрика $\rho(x, y)$ для анализа отношений по описанию объектов E_0 . Обозначим

$$L(E_0, \rho) = \{S \in E_0 \mid S_i \in K_{3-t}, \rho(S, S_i) = \min_{S_j \in K_t} \rho(S_j, S_i), t = 1, 2\}$$

— множество граничных объектов классов, определяемое на E_0 по метрике $\rho(x, y)$. Объекты $S_i, S_j \in K_t, t = 1, 2$, считаются связанными между собой ($S_i \leftrightarrow S_j$), если $\{S \in L(E_0, \rho) \mid \rho(S, S_i) < r_i \text{ и } \rho(S, S_j) < r_j\} \neq \emptyset$, где $r_i(r_j)$ — расстояние до ближайшего от $S_i(S_j)$ объекта из K_{3-t} по метрике $\rho(x, y)$.

Множество $G_{tv} = \{S_{v_1}, \dots, S_{v_c}\}, c \geq 2, G_{tv} \subset K_t, v < |K_t|$ представляет область (группу) со связанными объектами в классе K_t , если для любых $S_{v_i}, S_{v_j} \in G_{tv}$ существует путь $S_{v_i} \leftrightarrow S_{v_k} \leftrightarrow \dots \leftrightarrow S_{v_j}$. Объект $S_i \in K_t, t = 1, 2$, принадлежит группе из одного элемента и считается несвязанным, если не существует пути $S_i \leftrightarrow S_j$ ни для одного объекта $S_j \neq S_i$ и $S_j \in K_t$.

Алгоритм определения минимального числа непересекающихся групп из связанных и несвязанных объектов по каждому классу $K_t, t = 1, 2$, описан в работе [6]. Доказана единственность разбиения по числу групп и составу объектов в них. Требуется:

— отобразить описание объектов E_0 из $X(h)$ в R^2 с использованием предобработки данных операторами $\{A_i\}, i = 1, \dots, m$;

— оценить соответствие структур отношений объектов из E_0 в R^2 после предобработки данных операторами $A_i, A_j, i \neq j$.

2. О предобработке данных на основе классификации

Под предобработкой данных далее будем понимать преобразование значений признаков из $X(n)$ с учетом деления объектов на непересекающиеся классы. Предобработка данных предшествует реализации алгоритмов снижения размерности пространства через синтез латентных признаков для описания объектов. Интерес для исследования представляют:

— преобразования признаков, инвариантные к масштабам их измерений;

— выбор условия для последовательного формирования наборов признаков $X(h) \subset X(n), 2 \leq h \leq n$;

— поиск максимального значения меры компактности объектов классов в R^2 при отображении их описаний из $X(h)$ в R^2 .

Инвариантность к масштабам измерений определяется через оценку компактности значений признака в двухклассовой задаче распознавания. Оценка компактности вычисляется как экстремум критерия при разбиении значений признака на непересекающиеся интервалы. В основе вычислений лежит проверка истинности гипотезы "каждый интервал содержит значения признака всех объектов одного класса".

Пусть u_i^1, u_i^2 — число значений признака x_j класса $K_i, i = 1, 2$, соответственно в интервалах $[c_1, c_2], (c_2, c_3], |K_i| > 1, t$ — порядковый номер элемента упорядоченной по возрастанию последовательности $r_{j_1}, \dots, r_{j_i}, \dots, r_{j_m}$ значений x_j у объектов из E_0 , определяющий границы интервалов как $c_1 = r_{j_1}, c_2 = r_{j_i}, c_3 = r_{j_m}$. Критерий

$$\left(\frac{\sum_{i=1}^2 u_i^1(u_i^1 - 1) + u_i^2(u_i^2 - 1)}{\sum_{i=1}^2 |K_i|(|K_i| - 1)} \right) \times \left(\frac{\sum_{d=1}^2 \sum_{i=1}^2 u_i^d (|K_{3-i}| - u_{3-i}^d)}{2|K_1||K_2|} \right) \rightarrow \max_{c_1 < c_2 < c_3} \quad (1)$$

позволяет вычислять оптимальное значение границы c_2 для интервалов $[c_1, c_2]$ и $(c_2, c_3]$.

Экстремум критерия (1) используется в качестве веса $v_j (0 < v_j \leq 1)$ признака x_j . При $v_j = 1$ значения признака x_j у объектов из классов K_1 и K_2 не пересекаются между собой.

Реализация оператора для предобработки данных, инвариантных к масштабам измерений, разделяется на два этапа:

— вычисление границ двух непересекающихся интервалов для признака $x_i \in X(n)$ по критерию (1) на E_0 . Выбор экстремального значения критерия (1) в качестве веса признака;

— нормирование признака $x_i \in X(n)$ по значениям границ интервалов и умножение на его вес.

Предобработка значений признака $x_j \in X(n)$ с учетом разбиения на интервалы $[c_1, c_2], (c_2, c_3]$ по критерию (1) выглядит следующим образом:

$$x_j^* = v_j \frac{x_j - c_2}{c_3 - c_1}. \quad (2)$$

Для вычисления весов признаков, значения которых в отличие от критерия (1) зависят от принадлежности к набору $X(h) \subset X(n), 2 \leq h \leq n$, используется функционал [11]

$$J(w) = \frac{\sum_{i=1}^h w_i \theta_i}{\sum_{i=1}^h w_i \gamma_i} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где θ_i, γ_i — значения соответственно внутриклассовой близости и межклассового различия по признаку $x_i \in X(h)$. Функционал имеет бесконечное множество решений. При ограничении на веса $\sum_{i=1}^h w_i = 1, w_i \geq 0$ преобразуем (3) к виду

$$F(w, \lambda) = \frac{\sum_{i=1}^h w_i \theta_i}{\sum_{i=1}^h w_i \gamma_i} + \lambda \left(\sum_{i=1}^h w_i - 1 \right). \quad (4)$$

Используя метод неопределенных множителей Лагранжа к соотношению (4), получим

$$w_i = \begin{cases} \frac{\gamma_i - \theta_i}{\sum_{\{j|\gamma_j - \theta_j > 0\}} \gamma_j - \theta_j}, & \gamma_i - \theta_i > 0, \\ 0, & \gamma_i - \theta_i \leq 0. \end{cases} \quad (5)$$

Множество допустимых значений весов $\{w_i\}$ по выражению (5) зависит от способов вычисления $\{\theta_i, \gamma_i\}$. Рассмотрим два таких способа.

1 способ. Пусть m_{1i} и m_{2i} — математические ожидания признака $x_i \in X(n)$ для объектов из классов K_1 и K_2 . Тогда

$$\theta_i = \sum_{t=1}^2 \sum_{S_j \in K_t} |x_{ji} - m_{ti}| / m, \quad (6)$$

$$\gamma_i = \sum_{t=1}^2 \sum_{S_j \in K_{3-t}} |x_{ji} - m_{ti}| / m.$$

2 способ. Преобразуем значения количественного признака $x_i \in X(n)$ в два значения (градации) в номинальной шкале измерений. Выбор градаций проводится по двум интервалам $[c_1, c_2]$ и $(c_2, c_3]$, границы которых определены по соотношению (1). Обозначим g_{1i}^t, g_{2i}^t — частоты встречаемости значений градации t ($t = 1, 2$) в описании объектов в K_1 и K_2 . Тогда

$$\gamma_i = 1 - \frac{\sum_{t=1}^2 g_{1i}^t g_{2i}^t}{|K_1| |K_2|}; \quad (7)$$

$$\theta_i = 1 - \frac{\sum_{t=1}^2 g_{1i}^t (g_{1i}^t - 1) + g_{2i}^t (g_{2i}^t - 1)}{|K_1| (|K_1| - 1) + |K_2| (|K_2| - 1)}.$$

Вычисление внутриклассового сходства и межклассового различия по соотношению (7) востребовано при описании объектов в разно-

типном признаковом пространстве. При вычислении значений g_{1i}^t, g_{2i}^t нужно учитывать, что числа градаций у номинальных признаков разные и не обязательно равны 2.

Множество значений $\{\theta_i, \gamma_i\}$ можно использовать при формировании набора признаков $X(h) \subset X(n), 2 \leq h < n$. Согласно выводам теоремы из работы [11] признак x_j является кандидатом на удаление из $X(h+1)$, если

$$\frac{\theta_j}{\gamma_j} = \max_{x_i \in X(h+1)} \frac{\theta_i}{\gamma_i}. \quad (8)$$

В силу условия $\sum w_i = 1$ значение весов признаков (5) на каждом наборе $X(h)$ будут разные.

3. О соответствии структур отношений объектов классов при преобработке данных

Пусть после преобработки данных по набору $X(h), 2 \leq h \leq n$, оператором $A_i, i = 1, \dots, \mu$, проведено линейное отображение описаний объектов E_0 в R^2 . При анализе структуры данных по отношению связанности объектов классов в R^2 получено разбиение объектов на множество непересекающихся групп $Z_i = \{G_{id}\}_{d=1}^{p(i)}, 2 \leq p(i) \leq m$. Для сравнения двух структур отношений объектов в R^2 по Z_i и $Z_j, i \neq j$, сформируем матрицу $D = \{d_{uv}\}, u = 1, \dots, m, v = 1, 2, 3$. Значениями элементов d_{r1}, d_{r2} являются номера групп, к которым принадлежит объект $S_r \in E_0$ соответственно в Z_i и Z_j, d_{r3} — номер области, содержащей пересечение этих групп.

Обозначим $p_1(i), p_2(i)$ — число непересекающихся групп объектов из классов K_1 и K_2 в $Z_i, p(i) = p_1(i) + p_2(i)$. Максимальное число пересечений по Z_i и Z_j ограничено сверху:

$$p_1(i) p_1(j) + p_2(i) p_2(j).$$

Пусть η — число пересечений групп из Z_i и Z_j , содержащих q_1, \dots, q_η объектов, $\sum_{k=1}^{\eta} q_k = m$. Мера сходства структур отношений объектов по Z_i и Z_j будет вычисляться как

$$\Omega(Z_i, Z_j) = \frac{2 \sum_{k=1}^{\eta} (q_k)^2}{\sum_{k=1}^{p(i)} |G_{ik}|^2 + \sum_{k=1}^{p(j)} |G_{jk}|^2}. \quad (9)$$

Максимальное значение меры сходства (9), равное 1, получается при $\eta = p(i) = p(j)$.

Меру сходства (9) можно использовать для анализа соответствия структур отношений объектов в $X(h), 2 \leq h < n$, и в R^2 или в $X(h)$ и $X(t)$ при $t \neq h$.

Для оценки качества отображений описаний объектов из $X(h)$ в R^2 предлагается использовать меру компактности, полученную через отношение связности объектов. В качестве меры расстояния в R^2 рассматривается евклидова метрика. Меру компактности объектов по Z_i в классе K_t , $t = 1, 2$, определим как

$$\Omega(Z_i, K_t) = \frac{\sum_{\{G_{id} \in Z_i | G_{id} \cap K_t \neq \emptyset\}} |G_{id}|^2}{|K_t|^2}, \quad (10)$$

а в целом по выборке E_0 как

$$\begin{aligned} \Omega(Z_i, K_1 \cup K_2) &= \\ &= \frac{|K_1| \Omega(Z_i, K_1) + |K_2| \Omega(Z_i, K_2)}{m}. \end{aligned} \quad (11)$$

Дополнительным показателем при анализе структуры отношений объектов классов является число шумовых объектов. В данной работе множество шумовых объектов рассматривается как подмножество граничных объектов классов $L(E_0, \rho)$ по евклидовой метрике. Объект $S \in L(E_0, \rho) \cap K_j$, $j = 1, 2$, принадлежит множеству шумовых объектов D_j класса K_j , если

$$\left\{ \left\{ S_i \in E_0 \mid \rho(S_i, S) = \min_{S_i \in K_{3-j}, S_d \in K_j} \rho(S_i, S_d) \right\} \right\} > \left\{ \left\{ S_i \in K_j \mid \rho(S_i, S) < \min_{S_i \in K_j, S_d \in K_{3-j}} \rho(S_i, S_d) \right\} \right\}. \quad (12)$$

Удаление множеств D_1 и D_2 из E_0 изменяет структуру отношений объектов на $E_0 \setminus (D_1 \cup D_2)$ и служит средством повышения обобщающей способности алгоритмов распознавания по правилу ближайшего соседа.

4. Эксперименты

Вычислительный эксперимент проводили на выборке, содержащей данные о поражениях желудочно-кишечного тракта из работы [12]. Выборка представлена 76 объектами, разделенными на класс K_1 (доброкачественные поражения) и K_2 (злокачественные поражения), $|K_1| = 21$, $|K_2| = 55$. Каждый объект описывался 1394 количественными признаками.

При формировании последовательности из наборов признаков $X(n - 1)$, $X(n - 2)$, ..., $X(2)$ использовалось условие (8). Значение внутриклассового сходства θ_j и межклассового различия γ_j в условии (8) вычислялось по выражению (6). Для программной реализации метода РСА использовались функции из библиотеки языка PYTHON [13].

Пусть $R2(h)$ обозначает набор признаков, полученный при проецировании описаний объектов E_0 из $X(h)$ в R^2 . Исследовалась зависимость показателей компактности объектов классов (10) и выборки в целом (11) по $R2(h)$ от результатов предобработки данных по набору $X(h)$. Рассматривались следующие варианты представления данных:

- без предобработки;
- с нормированием в $[0; 1]$;
- с преобразованием по соотношению (2).

Результаты анализа данных по трем вариантам в $R2(h)$ и мера сходства структур отношений объектов в $X(h)$ и в $R2(h)$ приводится в табл. 1—3, визуальное представление объектов в R^2 представлено на рис. 1—3.

Таблица 1

Анализ сходства структур отношений объектов по $X(h)$ и $R2(h)$ без предобработки данных

Раз- мер- ность h	Число шумовых объектов по соотно- шению (12)	Компактность по вы- ражениям (10), (11)			Сходство по соот- ношению (9)
		K_1	K_2	$K_1 \cup K_2$	
1394	13	0,1565	0,4010	0,3334	0,6820
806	18	0,1882	0,4023	0,3432	0,6935
122	18	0,1882	0,4023	0,3432	0,6935
9	18	0,1791	0,4056	0,3430	0,7067

Таблица 2

Анализ сходства структур отношений объектов по $X(h)$ и $R2(h)$ с учетом нормирования данных в $[0;1]$

Раз- мер- ность h	Число шумовых объектов по соотно- шению (12)	Компактность по вы- ражениям (10), (11)			Сходство по соот- ношению (9)
		K_1	K_2	$K_1 \cup K_2$	
1394	19	0,1338	0,4519	0,3640	0,6309
806	24	0,1111	0,3408	0,2773	0,0159
122	17	0,3151	0,7051	0,5973	0,0197
9	12	0,6054	0,8611	0,7904	0,9831

Таблица 3

Анализ сходства структур отношений объектов по $X(h)$ и $R2(h)$ с предобработкой данных по (2)

Раз- мер- ность h	Число шумовых объектов по соотно- шению (12)	Компактность по вы- ражениям (10), (11)			Сходство по соот- ношению (9)
		K_1	K_2	$K_1 \cup K_2$	
1394	16	0,4059	0,6516	0,5837	0,8441
806	13	0,4649	0,6826	0,6225	0,8608
122	15	0,8231	0,8288	0,8272	0,1010
9	12	0,4693	0,8280	0,7289	0,9474

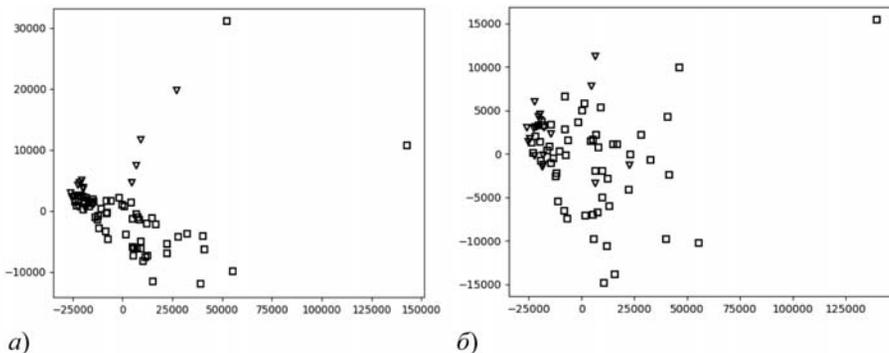


Рис. 1. Визуализация объектов без предобработки данных в пространстве:
 а — R2(1394); б — R2(122)

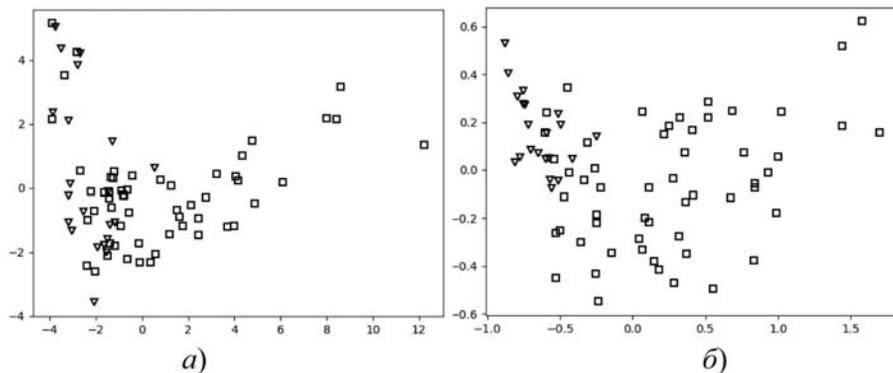


Рис. 2. Визуализация объектов с нормированием данных в [0;1] в пространстве:
 а — R2(1394); б — R2(9)

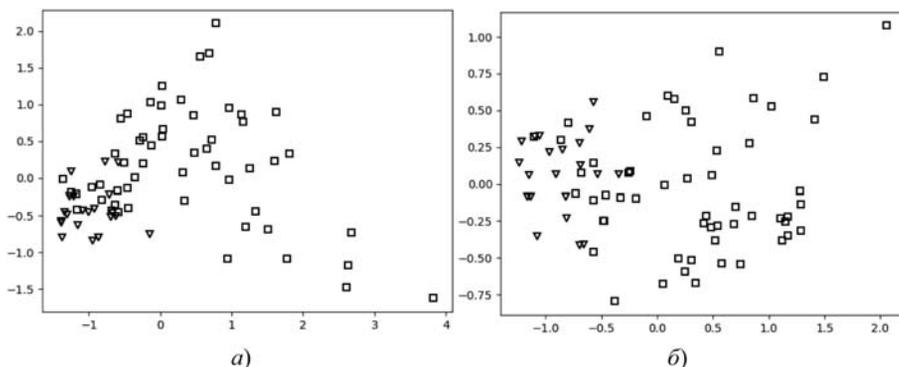


Рис. 3. Визуализация объектов при предобработке данных по соотношению (2) в пространстве:
 а — R2(1394); б — R2(122)

Таблица 4

Соответствие структур отношений объектов в $R2(h)$ без предобработки и с предобработкой данных

Размерность h	Мера соответствия по (9) с учетом предобработки	
	нормированием в [0, 1]	преобразованием по (2)
1394	0,6309	0,8440
806	0,5783	0,0243
122	0,0112	0,0394
9	0,0199	0,0185

Анализ табл. 1—3 показывает целесообразность использования предобработки данных. Показатели компактности объектов при нормировании данных в [0; 1] выше, чем на данных без предобработки. Самые высокие показатели компактности получены по $R2(122)$ при предобработке данных по соотношению (2).

Существует прямая зависимость между мерой компактности объектов классов и обобщающей способностью алгоритмов распознавания по правилу ближайшего соседа. Доказательство этого утверждения в форме вычислительного эксперимента приводится в работе [6].

Проверка соответствия структур отношений по $R2(h)$ без предобработки и с использованием предобработки данных представлен в табл. 4.

Анализ значений меры соответствия из табл. 4 показывает, что предобработка данных сильно искажает структуру отношений объектов. Объясняется это тем, что использование предобработки данных приводят к повышению компактности объектов классов в R^2 .

Заключение

Рассмотрена проблема снижения размерности признакового пространства и ее связь с предобработкой данных. Способы предобработки рассчитаны на использование таких операций, как нормирование признаков, умножение значения признака на его вес. Разработана мера соответствия структур отношений объектов в разных признаковых пространствах. При вычислении меры использовалось разбиение выборки на непересекающиеся группы. Для группировки применялось отношение связанности объектов классов по определяемому множеству гипершаров. Обоснованием выбора способа предобработки данных служит значение меры компактности классов и выборки в целом.

Список литературы

1. Айвазян С. А., Бухштабер В. М., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.
2. Дюк В. А. Методология поиска логических закономерностей в предметной области с нечеткой системологией: На примере клин.-эксперим. исслед. Дисс. д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 2005. 309 с.
3. Зиновьев А. Ю. Визуализация многомерных данных. Красноярск: Изд. КГТУ, 2000.
4. Загоруйко Н. Г., Кутненко О. А., Зырянов А. О., Леванов Д. А. Обучение распознаванию образов без переобучения // Машинное обучение и анализ данных, 2014. Т. 1, № 7. С. 891–901.
5. Zguralskaya E. N. Analysis of the structure of the relationship between the descriptions of objects of classes and evaluation of their compactness // Workshop Proceedings Information Technology and Nanotechnology (ITNT-2019). Samara, Russia, May 21–24. 2019. P. 283–289. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2416>.
6. Ignatyev N. A. Structure Choice for Relations between Objects in Metric Classification Algorithms // Pattern Recognition and Image Analysis. 2018. Vol. 28, N.4. P. 590–597.
7. Саидов Д. Ю. Информационные модели на основе нелинейных преобразований признакового пространства в задачах распознавания. Дисс. доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам. Ташкент, 2017. 93 с.
8. Saidov D. Y. Data visualization and its proof by compactness criterion of objects of classes // International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA). 2017. Vol. 9, N. 8. P. 51–58.
9. Мюллер А., Гвидо С. Введение в машинное обучение с помощью Python. Руководство для специалистов по работе с данными. СПб.: ООО "Альфа-книга", 2017. 480 с.
10. Мясников Е. В. Анализ методов снижения размерности в задаче представления коллекции цифровых изображений // Компьютерная оптика. 2008. Т. 32, № 3. С. 296–301.
11. Игнатъев Н. А. Выбор минимальной конфигурации нейронных сетей // Вычислительные технологии. 2001. Т. 6, № 1. С. 23–28.
12. Mesejo P. et al. Computer-Aided Classification of Gastrointestinal Lesions in Regular Colonoscopy // IEEE Transactions on Medical Imaging. 2016. Vol. 35, N. 9. P. 2051–2063.
13. Scikit-learn user guide: Release 0.21.3. 2019.

N. A. Ignat'ev, D. Sc., Professor, e-mail: ignatev@rambler.ru,
M. Y. Lolaev, Teacher, musulmon.lolayev.94@mail.ru,
National University of Uzbekistan, Tashkent

An Analysis of the Compliance of the Structures of Relations of Objects of Classes on the Varieties of their Descriptions

The synthesis of latent features is considered in order to reduce the size of the space for describing objects of disjoint classes K_1, K_2 . A condition is proposed for the sequential formation of feature sets $X(h) \subset X(n)$, $2 \leq h \leq n$ for linear display of object descriptions from $X(h)$ to R^2 . Latent features are synthesized from data obtained as a result of preprocessing the values of the initial features. Preprocessing is realized through normalization in $[0,1]$ and data transformation that is invariant to the scales of feature measurements. The correspondence structures of objects in $X(h)$ and R^2 are investigated according to the results of data preprocessing and grouping. A measure of compliance of two structures of relations of objects in different features spaces is proposed. The measure of compliance is calculated by splitting the objects of classes into disjoint groups. When splitting into groups, the relation of connectedness of class objects by a defined set of hyper balls is used.

Keywords: data preprocessing, principal component analysis, compactness measure, dimensionality reduction

DOI: 10.17587/it.27.18-24

References

1. Ayvazyan S. A., Bukhshtaber V. M., Yenyukov I. S., Meshalkin L. D. Prikladnaya statistika. Klassifikatsiya i snizheniye razmernosti, Moscow, Finansy i statistika, 1989, 607 p. (in Russian).
2. Dyuk V. A. Metodologiya poiska logicheskikh zakonornostey v pred-metnoy oblasti s nechetkoy sistemologiyey: na primere klin.-eksperim. Issled, Dis. d-ra tekhn. nauk. Sankt-Peterburg, 2005, 309 p. (in Russian).
3. Zinov'yev A. Yu. Vizualizatsiya mnogomernykh dannykh, Krasnoyarsk, Izd. KGTU, 2000 (in Russian).
4. Zagoruyko N. G., Kutnenko O. A., Zyryanov A. O., Levanov D. A. Obucheniye raspoznavaniyu obrazovannykh bez pereobucheniya, *Mashinnoye Obucheniye i Analiz Danykh*, 2014, vol. 1, no. 7, pp. 891–901 (in Russian).
5. Zguralskaya E. N. Analysis of the structure of the relationship between the descriptions of objects of classes and evaluation of their compactness, *Workshop Proceedings Information Technology and Nanotechnology (ITNT-2019)*, Samara, Russia, May 21–24, 2019, pp. 283–289, available at: <http://ceur-ws.org/Vol-2416> (in Russian).
6. Ignatyev N. A. Structure Choice for Relations between Objects in Metric Classification Algorithms, *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2018, vol. 28, no. 4, pp. 590–597.
7. Saidov D. Yu. Informatsionnyye modeli na osnove nelineynogo preobladaniya priznakovogo prostranstva v zadachakh raspoznavaniya, Diss. doktor filosofii (PhD) po fiziko-matematicheskim naukam. Tashkent, 2017, 93 p. (in Russian).
8. Saidov D. Y. Data visualization and its proof by compactness criterion of objects of classes, *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)*, 2017, vol. 9, no. 8, pp. 51–58.
9. Muller A., Gvido S. Vvedeniye v mashinnoye obucheniye s pomoshch'yu Python. Rukovodstvo dlya spetsialistov po rabote s dannyimi, SPb., OOO "Al'fa-kniga", 2017, 480 p. (in Russian).
10. Myasnikov Ye. B. Analiz metodov umen'sheniya razmera v zadache predstavleniya kolektsii tsifrovyykh izobrazheniy, *Komp'yuternaya Optika*, 2008, vol. 32, no. 3, pp. 296–301 (in Russian).
11. Ignat'yev N. A. Vybory minimal'noy konfiguratsii neyronnykh setey, *Vychislitel'nyye Tekhnologii*, Novosibirsk, 2001, vol. 6, no. 1, pp. 23–28 (in Russian).
12. Mesejo P. et al. Computer-Aided Classification of Gastrointestinal Lesions in Regular Colonoscopy, *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2016, vol. 35, no. 9, pp. 2051–2063.
13. Scikit-learn user guide: Release 0.21.3, 2019.

Т. Г. Пенькова, канд. техн. наук, доц., ст. науч. сотр., e-mail: penkova_t@icm.krasn.ru,
С. Н. Кочетков, программист I кат., e-mail: serega@icm.krasn.ru,
Институт вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск

Технологический подход к организации унифицированного обмена данными между гетерогенными системами

Предложен технологический подход к организации обмена данными между гетерогенными системами, основанный на формировании унифицированного представления структур данных. Представлена формальная и концептуальная модели унифицированного обмена данными. Предложена архитектура программных средств, обеспечивающая организацию унифицированного обмена данными. Элементы технологического подхода рассматриваются на примере размещения заказа для государственных и муниципальных нужд.

Ключевые слова: унифицированный обмен данными, информационное взаимодействие гетерогенных систем, технологический подход, концептуальная модель, архитектура программных средств

Введение

Современный уровень и масштаб автоматизации различных видов деятельности создают необходимость обеспечения информационного взаимодействия разнородных систем. Системы, функционирующие в организациях, должны иметь возможность обмениваться данными между собой и с внешними ресурсами [1, 2]. Одним из ярких примеров, где информационное взаимодействие систем и обмен данными между гетерогенными ресурсами наиболее актуальны и востребованы, является сфера размещения заказа для государственных и муниципальных нужд. Государственная политика, направленная на открытость данных, а также нормативно-правовая база в сфере закупок обязывают органы власти, реализующие процедуры закупок, и учреждения, осуществляющие закупки за счет бюджетных средств, организовать интеграцию систем поддержки размещения заказа с Официальным общероссийским сайтом закупок и двусторонний информационный обмен с Электронными торговыми площадками [3, 4]. При этом задача организации взаимодействия систем существенно усложняется тем, что объект информационного обмена меняется достаточно часто, и каждая система имеет свой формат хранения данных.

Существуют несколько основных подходов к организации межсистемного взаимодействия. Одним из наиболее простых способов является передача файлов (*File Transfer*), при этом файл выступает как универсальный механизм хранения данных [5]. Однако несмотря на наличие общего формата обмена в процессе создания, передачи или обработки файлов высока вероятность возникновения рассинхронизации данных. Другой подход — использование общей базы данных (*Shared Database*) [6], где все системы работают с актуальной и синхронизированной информацией, однако общая база данных может стать "слабым звеном" интеграционного решения и причиной отказа работы при увеличении числа взаимодействующих систем. Следующий подход — обмен сообщениями (*Messaging*), позволяющий избежать большинства из указанных проблем, но реализация данного решения требует более сложного процесса разработки, тестирования и отладки [7]. Также в последнее время широко применяется сервис-ориентированная архитектура (*SOA, Service-oriented Architecture*), позволяющая использовать веб-сервисы для взаимодействия разнородных информационных систем [8, 9]. Кроме этого, часто задача обмена данными решается путем разработки дополнительных программных модулей, преобразующих данные из одного формата в другой для конкретного объекта информационного обмена [10—13].

Такой подход сопровождается необходимостью создания нового модуля для каждого нового информационного объекта или системы, а также перепрограммирования модуля в случае изменения схемы хранения данных у одной из взаимодействующих систем. Таким образом, возможности современных технологий, преимущества подходов, а также ограничения существующих решений определяют актуальность разработки технологического подхода, обеспечивающего унифицированный обмен данными между гетерогенными системами с учетом вариативности форматов хранения данных и условий функционирования взаимодействующих систем.

В данной работе предложен технологический подход к организации обмена данными между гетерогенными системами, основанный на формировании унифицированного представления структур данных. Представлена формальная и концептуальная модели унифицированного обмена данными, основанные на развитии ранее предложенной модели межсистемного взаимодействия [13, 14]. Предложена архитектура программных средств, обеспечивающая организацию унифицированного обмена данными. Элементы технологического подхода рассматриваются на примере задачи размещения заказа для государственных и муниципальных нужд.

Модель унифицированного обмена данными

Обмен данными между системами можно представить в виде пары:

$$M = (\langle O_{In}, I_{In} \rangle, \langle O_{Out}, I_{Out} \rangle),$$

где I — системы информационного обмена; O — объекты информационного обмена. Каждая система может участвовать в информационном обмене в качестве "отправителя" (I_{In}) или "получателя" (I_{Out}). При этом одна и та же система может выступать одновременно в качестве "отправителя" и "получателя", например, когда необходимо перевести данные из одного формата в другой в рамках одной информационной системы. Система информационного обмена характеризуется рядом параметров, описывающих ее особенности: способ хранения данных, параметры доступа к данным, канал связи и др. Объект информационного обмена можно представить как тройку: $O = \langle D, F, S \rangle$, где D — передаваемые или получаемые системой данные, F — формат хранения данных, S — структура, в которой представлены данные. Для системы "отправителя" и системы "получателя" объект информационного

обмена определяется как $O_{In} = \langle D_{In}, F_{In}, S_{In} \rangle$ и $O_{Out} = \langle D_{Out}, F_{Out}, S_{Out} \rangle$ соответственно. Процесс унифицированного обмена данными заключается в преобразовании информационного объекта "отправителя" в информационный объект "получателя" на основе формирования унифицированного представления структур данных и может быть представлен следующей цепочкой:

$$\begin{aligned} O_{in} \langle D_{In}, F_{In}, S_{In} \rangle &\xrightarrow{Q \langle D_{In}, S_{In} \rangle} U_{In} \langle D_{In}, S_{In} \rangle \xrightarrow{G \langle U_{In}, S_{Out} \rangle} \\ &\xrightarrow{G \langle U_{In}, S_{Out} \rangle} U_{Out} \langle D_{Out}, S_{Out} \rangle \xrightarrow{\bar{Q} \langle D_{Out}, S_{Out}, F_{Out} \rangle} \\ &\xrightarrow{\bar{Q} \langle D_{Out}, S_{Out}, F_{Out} \rangle} O_{Out} \langle D_{Out}, F_{Out}, S_{Out} \rangle, \end{aligned}$$

где Q — оператор унификации, выполняющий преобразование данных "отправителя" в унифицированный вид: $Q: O_{In} \rightarrow U_{In}$, U_{In} — данные "отправителя" в терминах унифицированной модели; \bar{Q} — оператор деунификации, выполняющий преобразование данных в терминах унифицированной модели в формат данных "получателя": $\bar{Q}: U_{Out}, F_{Out} \rightarrow O_{Out}$, где U_{Out} — данные "получателя" в терминах унифицированной модели, F_{Out} — это формат хранения данных "получателя". При этом унифицированная модель U представляет собой некоторую универсальную иерархическую структуру, не зависящую от формата данных, в терминах которой может быть представлена любая структура данных. G — оператор, выполняющий преобразование унифицированной структуры данных "отправителя" в унифицированную структуру данных "получателя": $G: U_{In}, S_{Out} \rightarrow U_{Out}$. Оператор G работает с определенной парой структур (структурой данных "отправителя" и структурой данных "получателя") и не зависит от содержания данных, что позволяет использовать оператор многократно для обмена данными заданных структур. На рис. 1 представлена концептуальная модель унифицированного обмена данными в виде диаграммы классов в нотации *UML (Unified Modeling Language)*, описывающая логику процесса, основные сущности и отношения между ними [15].

Согласно формальному определению процесса унифицированного обмена концептуальная модель содержит следующие базовые классы: "Система информационного обмена", "Коммуникационный канал", "Объект информационного обмена", "Формат хранения", "Структура объекта", "Унифицированная модель", "Оператор унификации / деунификации" и "Оператор преобразования". Связь между сущностями определяется соответствующим типом отношений. Отношение агрегации уста-

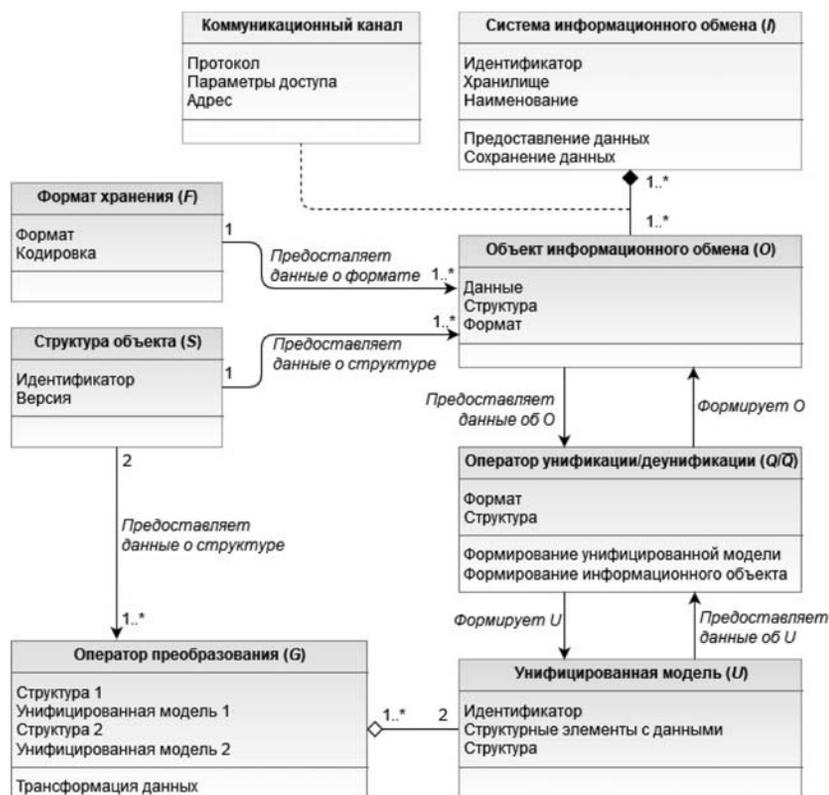


Рис. 1. Концептуальная модель унифицированного обмена данными

навливается между сущностями, когда одна сущность включает множество экземпляров другой сущности и описывает иерархию объектов. На диаграмме отношение агрегации изображается линией с незакрашенным ромбом со стороны сущности-агрегата и с обозначением кратности полюсов, характеризующим число экземпляров сущностей, участвующих в отношении. Отношение композиции задает жесткую зависимость времени существования сущности-части от сущности-агрегата. Графически отношение композиции изображается так же, как и отношение агрегации, но с закрашенным ромбом. Отношение ассоциации отражает наличие произвольной взаимосвязи между сущностями и изображается линией с указанием имени и числа экземпляров сущностей, участвующих в отношении. Отношение зависимости отражает влияние класса, на диаграмме обозначается штриховой линией. Рассмотрим основные атрибуты и характер отношений элементов модели, описывающей информационный обмен на основе унифицированного представления структур данных.

Система информационного обмена (*I*) на диаграмме представлена классом "Система информационного обмена". К данному классу относятся системы, подсистемы или модули системы, осуществляющие отправку или получение данных.

Так, например, в сфере управления закупками в качестве систем информационного обмена выступают модули Автоматизированной системы поддержки размещения муниципального заказа (АСП МЗ), внешние системы размещения заказа (ВСРЗ), Официальный общероссийский сайт закупок (ООС) и электронные торговые площадки (ЭТП). Основными атрибутами данного класса являются: "Идентификатор", "Наименование" и "Хранилище". "Идентификатор" и "Наименование" определяют "отправителя" и "получателя" в процессе информационного обмена, "Хранилище" задает способ и формат хранения данных у "отправителя" и "получателя". Любая информационная система может осуществлять отправку и прием множества объектов информационного обмена.

Объект информационного обмена (*O*) представлен классом "Объект информационного обмена" и связан с классом "Система информационного обмена" *n*-арным отношением композиции. К объекту информационного обмена относятся данные, передаваемые "отправителем" (или направляемые "получателю") в определенном формате.

Активное развитие веб-сервисов создало стандарт обмена данными в виде XML-документов. Так, при организации закупок, из АСП МЗ на ООС и ЭТП передаются сведения о закупках и заключенных контрактах в виде XML-документов, такие как: "Извещение о проведении закупки", "Протокол рассмотрения заявок", "Протокол подведения итогов" и др. В свою очередь, АСП МЗ получает с ООС XML-документы: "План-график закупок", "Сведения о заключенных контрактах", а также необходимые справочники, с ЭТП — "Заявки", "Сведения о поставщике" и др. Кроме того, большинство корпоративных систем в качестве хранилища данных используют реляционные базы данных. Например, между подсистемами АСП МЗ осуществляется передача сведений о планировании закупки и заключении контрактов. Также одной из распространенных форм передачи данных остаются документы, подготовленные средствами Microsoft Word в форматах doc и docx. Например, подсистемами АСП МЗ автоматически формируются и передаются такие документы, как: "Извещение о проведении закупки", "Протокол рассмотрения заявок", "Протокол подведения итогов", "Протокол аукциона" и др.

Класс "*Коммуникационный канал*" обеспечивает передачу объекта информационного обмена между системами. Атрибутами данного класса являются "*Протокол*", "*Параметры доступа*", "*Адрес*", "*Порт*". Например, ВСПЗ обмениваются по протоколу AS2, АСП МЗ принимает данные по протоколу HTTPS с использованием криптографического протокола TLS. XML-документы АСП МЗ формируются в кодировке UTF-8. Информация в АСП МЗ передается с использованием метода POST (Content-Type: multipart/form-data), используя параметры: имя пользователя, пароль пользователя, тип клиента, электронная подпись XML-документа. После получения POST-запроса ООС осуществляет контроль полученной информации по заданным параметрам доступа. Запрос протокола, содержащего сведения о результатах загрузки, ошибках, выявленных нарушениях, выполняется с использованием метода GET, используя такие параметры, как имя пользователя, пароль пользователя, номер загрузки.

Основными атрибутами класса "*Объект информационного обмена*" являются: "*Данные*" (*D*), "*Формат*" (*F*) и "*Структура*" (*S*). Атрибут "*Данные*" определяет содержание объекта информационного обмена. В сфере организации закупок передаваемые данные, как правило, регламентируются законодательными актами и соглашениями информационного взаимодействия.

Атрибут "*Формат*" определяет формат хранения данных в системе информационного обмена и формируется классом "*Формат хранения*" с атрибутами "*Формат*" и "*Кодировка*", от которых зависит способ чтения и записи данных. В настоящее время существует множество форматов хранения, наиболее популярными из них являются XML (eXtensible Markup Language), JSON (Java Script Object Notation), RDB (Relational Data Base), значительно реже в межсистемном взаимодействии используются CSV (Comma-Separated Values) и DOCX (Microsoft Word Open XML Document).

Атрибут "*Структура*" определяет состав и порядок расположения информационных элементов объекта и формируется классом "*Структура объекта*" с атрибутами "*Идентификатор*" и "*Версия*", которые однозначно определяют структуру данных. Обмен одними и теми же данными между системами может осуществляться в одном формате, но в разных структурах. Например, в задаче управления закупками системы ВСПЗ предоставляют одинаковые данные в ЕИС и ЭТП в формате XML, используя при этом разные структуры данных, что связано с независимой разработкой протоколов обмена систем. Формат хранения и структура данных

являются ключевыми метаданными о способе обработки информационного объекта.

Для любого объекта информационного обмена характерна иерархическая структура данных. Например, структура XML-документов описывается с помощью схем данных XSD (XML-schema) и представляет собой дерево, каждый узел которого является XML-тегом и имеет набор свойств, позволяющих определять наличие и число узлов в XML-документах. Структура реляционной базы данных также может быть представлена в виде двухуровневого списка — набора таблиц и их полей. При этом современные СУБД предоставляют доступ к метаданным, из которых можно получить описание таблиц и полей. Структура документов Microsoft Word может быть представлена в виде иерархии элементов, заданных с помощью специализированного языка разметки с набором свойств, позволяющих управлять структурой и содержанием документов. Таким образом, структуры данных объекта информационного обмена в разных форматах за счет единых принципов построения могут быть сопоставлены друг с другом посредством некоторой иерархической унифицированной модели.

Унифицированная модель (*U*) представлена классом "*Унифицированная модель*" и представляет собой набор универсальных взаимосвязанных структурных элементов, организованных по иерархическому принципу, к которому может быть преобразована любая структура данных. В отличие от объекта информационного обмена унифицированная модель не обладает определенным форматом хранения. Основными атрибутами данного класса являются "*Идентификатор*" и "*Структурные элементы*". Представление разнородных структур данных в виде унифицированной модели позволяет сопоставлять и автоматически преобразовывать данные разных систем.

Операции унификации (*Q*) и деунификации (\bar{Q}) представлены на диаграмме классом "*Оператор унификации / деунификации*", связывающим класс "*Объект информационного обмена*" и "*Унифицированная модель*" посредством ассоциативных отношений: предоставление и формирование. Класс "*Оператор унификации / деунификации*" имеет два метода. Метод "*Формирование унифицированной модели*" осуществляет чтение данных из объекта информационного обмена, построение и наполнение структуры в терминах унифицированной модели, освобождаясь от формата хранения. Метод "*Формирование информационного объекта*" обеспечивает обратный процесс — извлечение данных из унифицированной модели в объект информационного обмена с конкретным форматом хранения.

Операция преобразования (G) представлена классом "Оператор преобразования". Основными атрибутами данного класса являются две пары — "Структура 1" и "Унифицированная модель 1" и "Структура 2" и "Унифицированная модель 2" — по одной на "отправителя" и "получателя". Класс "Оператор преобразования" имеет метод "Трансформация данных", который осуществляет перевод данных из одной унифицированной модели в другую путем сопоставления структурных элементов унифицированных моделей и выполнения преобразования данных по установленным взаимным отношениям. Класс "Оператор преобразования" связан с классом "Унифицированная модель" отношением агрегации и с классом "Структура объекта" ассоциативной связью: предоставление данных о структуре.

Унифицированная модель вместе с операциями унификации (деунификации) и преобразования предоставляют возможность автоматизировать процесс обмена данными между гетерогенными системами на основе преобразования структур данных в унифицированное представление, исключив необходимость перепрограммирования при добавлении новых объектов информационного обмена или изменении форматов хранения данных.

Архитектура программных средств унифицированного обмена данными

В соответствии с предложенной моделью разработана архитектура программных средств, обеспечивающая организацию унифицированного обмена данными. На рис. 2 представлена диаграмма, описывающая основные модули архитектуры и их взаимодействие.

На диаграмме "отправитель" и "получатель" данных представлены в виде UML-элементов "актер" — "Data supplier" и "Data recipient" соответственно. Весь процесс унифицированного обмена данными между гетерогенными системами можно условно разделить на два этапа: подготовка и применение.

Этап подготовки (верхняя часть диаграммы) включает такие процессы, как описание структуры данных и описание взаимного соответствия элементов структур данных, которые выполняются "отправителем" и "получателем" данных с помощью визуальных компонентов: *Structure Builder* и *Link Builder*.

Structure Builder — конструктор, предназначенный для описания структуры отправляемых (входных) или получаемых (выходных) данных (S_{In} и S_{Out}). Конструктор предоставляет пользователям информационных систем "отправителя" и "получателя" инструмент для моделирования структуры данных в терминах унифицированной модели. *Link Builder* — конструктор, предназначенный для установления связей между элементами двух разных унифицированных структур, а также для описания операций над отдельными элементами, выполнение которых необходимо при преобразовании одной структуры в другую (*Links Set*). Доступ к визуальным конструкторам обеспечивается через web-интерфейс. *Cross Operand Builder* — конструктор, который на основании описаний структур данных и взаимосвязей между элементами формирует сценарий преобразования данных $A(S_{In}, S_{Out})$ в виде последовательности команд выполнения операций над элементами унифицированных структур данных (перестановка, удаление, агрегация, перерасчет и др.). Поскольку необходимо учитывать особенности структур входных и выходных данных, а также возможные изменения самих данных, сценарий преобразования данных имеет строго односторонний характер, обратное преобразование выполняется по отдельному сценарию. По-

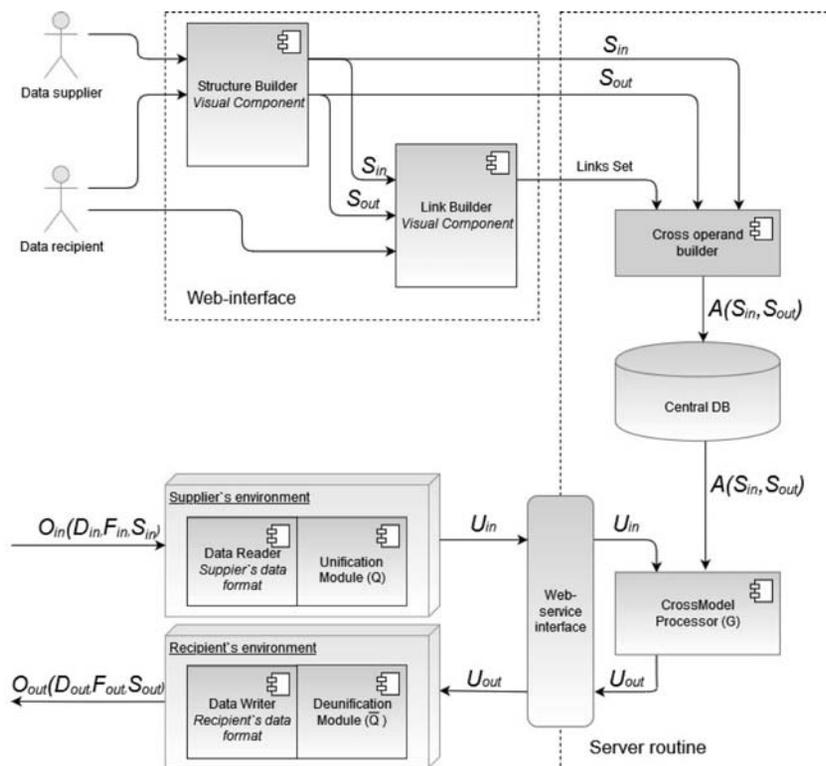


Рис. 2. Архитектура программных средств организации унифицированного обмена данными

строенный сценарий преобразования данных сохраняется в базу данных *Central DB* для дальнейшего применения.

Этап применения (нижняя часть диаграммы) направлен непосредственно на преобразование данных. На вход цепочки преобразования "отправителем" передается объект информационного обмена $O_{In} = \langle D_{In}, F_{In}, S_{In} \rangle$. Формирование унифицированного представления выполняется с помощью двух модулей: *Data Reader* и *Unification Module*. *Data Reader* — модуль, выполняющий считывание данных из источника в формате "отправителя" (F_{In}). *Unification Module* — модуль унификации (Q), выполняющий перевод считанных данных в термины унифицированной модели (U_{In}) и освобождающий данные от их физической природы — формата хранения (F_{In}). В целях устранения возможных конфликтов политик безопасности модули работают на стороне "отправителя" (*Supplier's environment*). На сервер обработки передаются готовые к дальнейшему преобразованию данные в унифицированном виде (U_{In}). *Cross Model Processor* (G) — модуль преобразования, выполняющий преобразование данных отправителя в унифицированном виде (U_{In}) в требуемые получателем данные в унифицированном виде (U_{Out}) на основе заданного сценария $A(S_{In}, S_{Out})$. Сценарий преобразования выбирается из базы данных *Central DB* по паре структур (S_{In}, S_{Out}), где S_{In} — структура, в которой представлены унифицированные данные "отправителя" (U_{In}), S_{Out} — структура, в которой представлены унифицированные данные "получателя" (U_{Out}). В результате обработки — выполнения команд сценария — модулем преобразования *Cross Model Processor* формируются данные "получателя" в терминах унифицированной модели (U_{Out}).

Формирование объекта информационного обмена "получателя" выполняется на стороне "получателя" (*Recipient's environment*) с помощью двух модулей: *Deunification Module* и *Data Writer*. *Deunification Module* — модуль деунификации (\bar{Q}), выполняющий перевод данных в терминах унифицированной модели (U_{Out}) в данные в формате хранения "получателя" (F_{Out}). *Data Writer* — модуль, выполняющий запись объекта информационного объекта "получателя" $O_{Out} = \langle D_{Out}, F_{Out}, S_{Out} \rangle$ в хранилище. Обмен данными между сервером обработки и клиентским окружением "отправителя" и "получателя" осуществляется посредством *Web-service* интерфейса. Возможность хранения сценария преобразования $A(S_{In}, S_{Out})$ позволяет при однократной подготовке структур данных многократно выполнять преобразование данных из структуры S_{In} в структуру S_{Out} . Представленная архитек-

тура программных средств обеспечивает унифицированный обмен данными между гетерогенными системами с учетом вариативности форматов хранения данных и условий функционирования взаимодействующих систем.

Заключение

Обмен данными между гетерогенными системами сегодня является необходимым условием автоматизации деятельности различных организаций. В данной работе предложен технологический подход к унифицированному обмену данными, учитывающий особенности функционирования взаимодействующих систем и вариативность форматов данных. Подход заключается в применении иерархической унифицированной модели, в терминах которой может быть представлена любая структура данных, и последующем выполнении преобразований унифицированных структур. Основные элементы и логика процесса унифицированного обмена описаны с помощью формальной и концептуальной моделей. Ключевыми элементами унифицированного обмена являются унифицированная модель, оператор унификации (деунификации), выполняющий перевод исходных данных в унифицированный вид (и наоборот), и оператор, выполняющий преобразование одной унифицированной структуры данных в другую. Унифицированная модель и операторы позволяют автоматизировать процесс обмена данными, исключив необходимость перепрограммирования при добавлении новых объектов информационного обмена или изменении форматов хранения данных. Также в работе предложена архитектура программных средств, позволяющая реализовать стандартизированный обмен данными на основе формирования унифицированного представления структур данных.

Последующие этапы развития предложенного подхода связаны с разработкой структуры унифицированной модели, алгоритмов формирования и преобразования унифицированных представлений структур данных для различных форматов.

Список литературы

1. Hohpe G., Wolf B. Enterprise integration patterns: design, building, and deploying messaging solutions. Addison-Wesley Professional: Computers, 2004. 683 p.
2. Hasselbring W. Information system integration // Communications of the ACM. 2000. Vol. 3, N. 6. P. 33–38. DOI: 10.1145/336460.336472.
3. Закон РФ "О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд" от 05.04.2013 № 44-ФЗ (в ред. от 24.04.2020).

4. **Morozov R., Zhuchkov D.** Heterogeneous Information Systems Interaction // Proceedings of 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC). 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/RPC.2018.8482146.

5. **Fedak G., He H., Cappello F.** BitDew: a programmable environment for large-scale data management and distribution // Proceedings of International conference for high performance computing, networking, storage and analysis. 2008. P. 1–12.

6. **Haas L. M., Lin E. T., Roth M. A.** Data integration through database federation // IBM Systems Journal. 2002. Vol. 41, N. 4. P. 578–596.

7. **Damodaran S.** B2B integration over the internet with XML — RosettaNet successes and challenges // Proceedings of the 13th international World Wide Web conference on Alternate track papers & posters. 2004. P. 188–195. DOI: 10.1145/1013367.1013398.

8. **Хохгуртль Б.** С# и Java: межплатформенные Web-сервисы. М.: Связь, 2004. 213 с.

9. **Ужаринский А. Ю.** Модель интеграции разнородных источников данных при объединении разнородных приложений на основе web-сервисов // Информационные системы и технологии. 2013. № 6 (80). С. 46–53.

10. **Fernandez M. F., Morishima A., Suci D., Tan W.-Ch.** Method for converting relational data into XML. Patent US 6785673 B1, 2004.

11. **Vrdoljak B., Banek M., Rizzi S.** Designing Web Warehouses from XML Schemas // LNCS. 2003. Vol. 2737. P. 89–98.

12. **Пенькова Т. Г., Коробко А. В., Жучков Д. В., Белорусов А. И., Морозов Р. В.** Программный модуль межсистемного информационного обмена в сфере организации муниципальных закупок // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017663163, 2017.

13. **Пенькова Т. Г., Коробко А. В.** Концептуальная модель межсистемного информационного взаимодействия на основе унифицированного представления структуры обмена данными // Информатизация и связь. 2017. № 3. С.17–22.

14. **Penkova T., Kochetkov S.** Unified Hierarchical Model of the Data Exchange // Advances in Intelligent Systems Research. 2017. Vol. 153 P. 143–146. DOI:10.2991/amms-17.2017.33.

15. **Фаулер М.** UML. Основы. Пер. с англ. СПб: Символ Плюс, 2004. 192 с.

T. G. Penkova, PhD, Senior Research Associate, e-mail: penkova_t@icm.krasn.ru,
S. N. Kochetkov, Programmer, e-mail: serega@icm.krasn.ru,
Institute of Computational Modelling SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation

Technological Approach to the Organization of a Unified Data Exchange between Heterogeneous Systems

This paper presents a technological approach to the organization of a unified data exchange between heterogeneous systems based on the formation of unified representation of data structures. The formal and conceptual models of unified data exchange are presented here. There is proposed the software architecture that provides unified data exchange. Elements of the technological approach are considered in the case of orders for state and municipal needs.

Keywords: unified data exchange, informational interaction of heterogeneous systems, technological approach, conceptual model, software architecture

DOI: 10.17587/it.27.25-31

References

1. **Hohpe G., Wolf B.** Enterprise integration patterns: designing, building, and deploying messaging solutions, Addison-Wesley Professional: Computers, 2004, 683 p.

2. **Hasselbring W.** Information system integration, Communications of the ACM, 2000, vol. 3, no. 6, pp. 33–38, DOI: 10.1145/336460.336472.

3. **The law** of the Russian Federation "On the contract system in the field of procurement of goods, work and services for state and municipal needs" dated 04.04.2013 No. 44-FZ (as amended on 04.24.2020) (in Russian).

4. **Morozov R., Zhuchkov D.** Heterogeneous Information Systems Interaction, Proceedings of 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications, 2018, pp. 1–4, DOI: 10.1109/RPC.2018.8482146.

5. **Fedak G., He H., Cappello F.** BitDew: a programmable environment for large-scale data management and distribution, Proceedings of International conference for high performance computing, networking, storage and analysis, 2008, pp. 1–12.

6. **Haas L. M., Lin E. T., Roth M. A.** Data integration through database federation, IBM Systems Journal, 2002, vol. 41, no. 4, pp. 578–596.

7. **Damodaran S.** B2B integration over the internet with XML — RosettaNet successes and challenges, Proceedings of the 13th international World Wide Web conference on Alternate track papers & posters, 2004, pp. 188–195, DOI: 10.1145/1013367.1013398.

8. **Hochgurtl B.** С # and Java: cross-platform Web services, Moscow, Svyaz, 2004, 213 p. (in Russian).

9. **Uzharinsky A. Yu.** Model for integrating heterogeneous data sources when combining heterogeneous applications based on web services, Informatsionnyye Sistemy i Tekhnologii, 2013, no. 6(80), pp. 46–53.

10. **Fernandez M. F., Morishima A., Suci D., Tan W.-Ch.** Method for converting relational data into XML, Patent US 6785673 B1, 2004.

11. **Vrdoljak B., Banek M., Rizzi S.** Designing Web Warehouses from XML Schemas, LNCS, 2003, vol. 2737, pp. 89–98.

12. **Penkova T. G., Korobko A. V., Zhuchkov D. V., Belorusov A. I., Morozov R. V.** Program module for intersystem information exchange in the field of municipal procurement, Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM RU 2017663163, 2017 (in Russian).

13. **Penkova T. G., Korobko A. V.** Conceptual model of cross-system interaction based on unified representation of data structure, Informatsiatsiya i svyaz', 2017, no. 3, pp. 17–22 (in Russian).

14. **Penkova T., Kochetkov S.** Unified Hierarchical Model of the Data Exchange, Advances in Intelligent Systems Research, 2017, vol.153, pp. 143–146, DOI:10.2991/amms-17.2017.33.

15. **Fowler M.** UML. The basics. Per. from English St. Petersburg, Symbol Plus, 2004, 192 p. (in Russian).

В. М. Гриняк, д-р техн. наук, проф.,
Владивостокский государственный университет экономики и сервиса

Проектирование системы 3D-позиционирования внутри помещений на основе Bluetooth-устройств¹

Обсуждается проблема навигации внутри помещений в условиях плохого качества или недоступности данных спутниковых навигационных систем. Рассматривается задача позиционирования объекта в трехмерном пространстве по данным Bluetooth-устройств, расположенных в помещении и образующих многопозиционную маячную систему наблюдения. Отмечается, что для успешной работы такой системы необходимо заранее оценивать характерную погрешность оценки координат позиционируемых объектов и при необходимости изменять конфигурацию маяков. Предлагается модельная интерпретация задачи позиционирования в виде системы алгебраических линейных уравнений. Такое представление позволяет строить априорные теоретические оценки погрешности определения координат объекта, определять области пространства, где точность позиционирования недостаточна. В работе приводятся данные расчетов ожидаемой точности решения задачи в различных характерных ситуациях и результаты натурных экспериментов, подтверждающих расчеты. В целом исследование оптимистично оценивает перспективы решения 3D-задач позиционирования внутри помещений с помощью Bluetooth-маяков.

Ключевые слова: информационная система, позиционирование внутри помещений, маячная система, Bluetooth, определение местоположения, метод наименьших квадратов

Введение

Задачи позиционирования внутри помещений в настоящее время выделены в самостоятельный класс навигационных задач. Они характеризуются особыми математическими моделями и алгоритмами, архитектурой программных решений, учитывающей особенности датчиков и программно-аппаратных платформ [1]. Главной особенностью систем позиционирования внутри помещений является использование дополнительных источников навигационной информации, так как традиционные данные от спутниковых навигационных систем второго поколения (GPS, Глонасс) могут быть не валидными (число видимых спутников может быть ограничено, прием их данных — неустойчивым, точность определения высоты объекта над поверхностью Земли может быть низкой ("проблема этажа")) [2]. В качестве таких альтернативных источников навигационной информации хорошо зарекомендовали себя устройства передачи данных Bluetooth, точки

доступа в интернет Wi-Fi, датчики атмосферного давления, магнитометр, инерциальные навигационные средства (акселерометры, гироскопы) и т.п. [3—5]. Их данные могут использоваться как по отдельности, так и совместно, в зависимости от решаемой задачи.

В настоящее время решения общего назначения на основе данных Wi-Fi и Bluetooth являются наиболее распространенными [6—8]. Причина этого в том, что при применении Wi-Fi возможно использование уже развернутых сетей передачи данных. Использование для задач навигации внутри помещений Bluetooth-устройств также имеет целый ряд преимуществ: это построение инфраструктуры на базе недорогого и распространенного оборудования, не требующего специальных профессиональных навыков персонала; возможность практически произвольного конфигурирования датчиков в помещении в силу их малого размера и автономности (не нужно подводить электропитание). Потенциальная точность позиционирования на основе данных Bluetooth выше, чем у Wi-Fi. Кроме того, дальность видимости Bluetooth-устройств невелика, их сигнал плохо проходит сквозь капитальные стены, и это решает "проблему этажа".

¹Работа поддержана грантом РФФИ, проект 18-07-00132.

Применение инерциальных датчиков привлекает автономностью и отсутствием привязки к внешней инфраструктуре, однако практически полезно оно только в случае использования измерительных устройств высокой точности, что возможно лишь для систем специального назначения [9—11]. Имеются также сведения о попытках разработки систем оптического типа, когда сравниваются данные сканирования помещения и изображения с камеры (в том числе кругового обзора) [12, 13]. Такие системы требуют больших вычислительных ресурсов и могут использоваться только в "контрастных" помещениях с хорошей освещенностью, чувствительны к появлению посторонних объектов, точность их в общем случае ниже, чем у систем на основе Wi-Fi/Bluetooth.

Наиболее популярный способ использования данных Wi-Fi и Bluetooth — определение местоположения объекта путем сравнения уровней сигнала от "видимых" датчиков с заранее измеренными значениями, привязанными к карте помещения (радиоотпечаток, радиокарта) [14—16]. Другой распространенный способ — решение задачи трилатерации [17, 18]. В этом случае по уровню принимаемого сигнала оцениваются дальности "объект—датчик". Этот способ аналогичен используемому, например, в гидроакустике [19, 20]. Оба способа методологически схожи, так как используют одинаковую информационную базу — измерения уровней сигнала в течение некоторого времени. При первом способе необходимо предварительно создать базу данных радиоотпечатка. Второй способ требует предварительной калибровки датчиков и решения задачи глобальной и местной координатной привязки (выставки) системы [21].

Традиционно системами позиционирования внутри помещений решаются 2D-навигационные задачи, известные реализации дают представления о характерной погрешности их решения [22—24]. Однако некоторые приложения требуют построения 3D-систем. К ним относятся задачи позиционирования небольших воздушных объектов (типа квадрокоптеров), используемых, например, для видеонаблюдения или доставки небольших грузов [12, 25]. Главной проблемой построения системы позиционирования для воздушных объектов является достижение требуемой точности определения их местоположения во всех трех осях. Другими словами, необходимо априорно оценивать возможную точность позиционирования при известной конфигурации датчиков и спланировать (спроектировать) число и рас-

положение датчиков должным образом, если точность позиционирования недостаточна.

В настоящей работе рассматривается модель многопозиционной маячной навигационной системы, построенной на основе датчиков Bluetooth и используемой для 3D-позиционирования воздушных объектов. Целью является разработка способа априорной оценки погрешности решения навигационной задачи и его демонстрация в характерных ситуациях. В качестве основы такого способа выбраны классические представления метода наименьших квадратов.

Основные модельные представления

Кортеж данных, передаваемых маяком Bluetooth, содержит довольно емкую информацию о его работе. Основными элементами данных для решения задачи позиционирования является уникальный идентификатор устройства и относительный уровень мощности принимаемого от него на объекте сигнала. Единицей измерения последнего, используемой в распространенных программных платформах, служит дБм. Уровень сигнала связан с дальностью "объект—маяк" следующим известным соотношением [26]:

$$u = u_* - 10n \lg(d/d_*).$$

Здесь u — уровень сигнала, принимаемого объектом, находящимся на расстоянии d от маяка; u_* — уровень сигнала (калибровочный уровень), измеренный на расстоянии d_* (калибровочное расстояние) от устройства; n — коэффициент затухания сигнала в окружающей среде. Параметры d_* и u_* являются настраиваемыми техническими характеристиками конкретного маяка. Параметр n также считается известным. Значения n , d_* и u_* могут быть определены при калибровке маяка.

Определим правую ортогональную систему координат x, y, z , связанную с помещением. Пусть имеются N маяков, "видимых" позиционируемым объектом. Дальность "объект—маяк" задается формулой

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}, \quad i = \overline{1, N},$$

где x, y, z — координаты объекта; x_i, y_i, z_i — координаты i -го маяка, $i = \overline{1, N}$.

Пусть измерение уровней сигнала проводится в течение некоторого отрезка времени. Уравнения измерений будут иметь следующий вид:

$$u_i(t_k) = u_{*i} - 10n \lg(\sqrt{(x(t_k) - x_i)^2 + (y(t_k) - y_i)^2 + (z(t_k) - z_i)^2} / d_{*i}) + \eta_i(t_k), \quad (1)$$

где $u_i(t_k)$ — уровень сигнала i -го маяка, принимаемого на объекте в момент времени t_k ; x_i, y_i, z_i — координаты i -го маяка; $x(t_k), y(t_k), z(t_k)$ — координаты объекта в момент времени t_k ; u_{*i} и d_{*i} — калибровочные значения уровня сигнала и расстояния i -го маяка; $\eta_i(t_k)$ — случайная величина инструментальной погрешности измерения i -го маяка, отнесенная к моменту времени $t_k, k = \overline{1, M}, M$ — число измерений от каждого датчика.

В том случае, если позиционируемый объект движется, система уравнений (1) дополняется моделью движения объекта, например, в случае равномерного прямолинейного движения это будут уравнения

$$\begin{aligned} x(t_k) &= x(t_*) + (t_k - t_*)v_x; \\ y(t_k) &= y(t_*) + (t_k - t_*)v_y; \\ z(t_k) &= z(t_*) + (t_k - t_*)v_z, \end{aligned} \quad (2)$$

где t_* — некоторый момент времени, может как принадлежать интервалу наблюдения, так и находиться вне него; v_x, v_y, v_z — компоненты вектора скорости объекта.

Будем считать неизвестными искомыми величинами координаты объекта. Известным общим подходом к решению задач типа (1) или (1), (2) является их линеаризация около некоторого опорного решения, характеризующего априорные представления о координатах и скоростях объекта. Линеаризация уравнения (1) приводит его к следующему виду:

$$\begin{aligned} \delta u_i(t_k) &= \frac{-10nd_{*i}(x(t_k) - x_i)}{\ln 10 \cdot ((x(t_k) - x_i)^2 + (y(t_k) - y_i)^2 + (z(t_k) - z_i)^2)} \delta x(t_k) + \\ &+ \frac{-10nd_{*i}(y(t_k) - y_i)}{\ln 10 \cdot ((x(t_k) - x_i)^2 + (y(t_k) - y_i)^2 + (z(t_k) - z_i)^2)} \delta y(t_k) + \\ &+ \frac{-10nd_{*i}(z(t_k) - z_i)}{\ln 10 \cdot ((x(t_k) - x_i)^2 + (y(t_k) - y_i)^2 + (z(t_k) - z_i)^2)} \delta z(t_k) + \eta_i(t_k), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\delta x(t_k), \delta y(t_k), \delta z(t_k)$ — погрешности априорных представлений о координатах объекта, $\delta u_i(t_k)$ — невязка измерения. Если объект движется, то система линейных алгебраических уравнений (3) дополняется линеаризованной моделью движения объекта. Запишем систему (3) в общем виде:

$$\delta \mathbf{Z} = \mathbf{H} \delta \mathbf{s}(t_*) + \boldsymbol{\xi}. \quad (4)$$

Здесь $\delta \mathbf{Z}$ — полный вектор (длины $M \cdot N$) невязок измерений на интервале наблюдения; $\delta \mathbf{s}(t_*)$ — вектор погрешностей априорных представлений о координатах или координатах и скоростях объекта в выбранный момент времени t_* ; \mathbf{H} — матрица коэффициентов; $\boldsymbol{\xi}$ — вектор приведенных погрешностей измерений.

Введем матрицу $\mathbf{Q} = \text{mean}[\boldsymbol{\xi} \boldsymbol{\xi}^T]$ — ковариационную матрицу случайного вектора $\boldsymbol{\xi}$. Она задается свойствами инструментальных погрешностей измерений $\eta_i(t_k)$ и считается известной. Матрица $\mathbf{D} = (\mathbf{H}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{H})^{-1}$ будет определять дисперсию погрешности оценки вектора состояния $\delta \hat{\mathbf{s}}(t_*)$, так что $\mathbf{D} = \text{mean}[(\delta \hat{\mathbf{s}}(t_*) - \delta \mathbf{s}(t_*))(\delta \hat{\mathbf{s}}(t_*) - \delta \mathbf{s}(t_*))^T]$. Здесь mean — оператор математического ожидания.

Следует отметить три аспекта разрешимости исходной задачи (1) и ее линеаризованного варианта (3). Первый — принципиальная разрешимость (существование и единственность решения) — интерпретируется полнотой ранга матрицы \mathbf{H} ; второй — устойчивость решения по Ж. Адамару — обусловленностью задачи; третий — погрешность решения в условиях погрешности измерений — значением соответствующих коэффициентов матрицы \mathbf{D} .

Принципиальная разрешимость. В силу линейной независимости в общем случае системы функций времени, образующих коэффициенты матрицы системы алгебраических линейных уравнений (3), можно говорить о принципиальной разрешимости рассматриваемой задачи позиционирования. Однако имеет место и существование запрещенных (ненаблюдаемых) опорных решений, приводящих систему уравнений (3) к вырождению. К таким решениям относятся случаи, когда все маяки и позиционируемый объект находятся в одной плоскости [27, 28].

Устойчивость решения. Для ответа на вопрос об устойчивости решения в условиях погрешностей вычислений на ЭВМ обратимся к следующему условию достаточного типа [29]:

$$\mu < \mu_*, \quad (5)$$

где μ — вычисленное значение числа обусловленности матрицы \mathbf{H} по отношению к ее спек-

тральной норме, а μ_* — некоторое критическое число. Например, известна такая оценка [30]:

$$\mu_* = \frac{1}{[\sqrt{u}(2u - 3)(4u + 27) + 11]\varepsilon_1}.$$

Здесь u — размерность вектора $\delta s(t_*)$; ε_1 — относительная точность представления чисел с плавающей точкой (например, при удвоенной (double)) точности $\varepsilon_1 \approx 10^{-16}$. Если принять $u = 6$, то $\mu_* \approx 10^{-13}$. Результаты моделирования показывают, что в типичных ситуациях условие (5) для рассматриваемой задачи как правило соблюдается.

Погрешность. В работах, опубликованных ранее, [22–24] было показано, что в рассматриваемой задаче матрица \mathbf{D} хорошо описывает вероятностные свойства как ее линеаризованного варианта (3), так и основного, исходно нелинейного варианта (1). Значения соответствующих коэффициентов матрицы \mathbf{D} позволяют оценить характерную точность определения координат объекта при той или иной заданной конфигурации системы маяков, используемых для навигации внутри помещения и различном числе используемых измерений. Это позволяет решить исходную поставленную задачу априорной оценки погрешности позиционирования.

Результаты расчетов и натуральных экспериментов

При проведении натуральных исследований использовались Bluetooth-маяки SKYLAB Beacon VG01 [31] и мобильный телефон HUAWEI WAS-LX1 на платформе Android в качестве позиционируемого объекта. Инструментальная погрешность измерений уровня сигнала маяков $\eta_i(t_i)$ была оценена при их калибровке как нормально распределенная случайная величина с дисперсией $25(\text{дБм})^2$; число измерений M от каждого датчика было принято равным 50, что соответствует длине интервала наблюдения приблизительно 3...5 с. Оценка координат объекта осуществлялась методом трилатерации (3).

Эксперименты проводили в помещении типа "холл" размером 10x10 м и высотой 4 м. Маяки располагались в вариантах, представленных в таблице. Позиционируемый объект покоился.

На рис. 1 показаны результаты позиционирования объекта в случае четырех маяков (расположены на полу по углам помещения). Реальное расположение объекта показано черным кружком. Оценка его местоположения — черными точками. В каждом случае проводили серию из

Варианты расположения маяков в помещении

Номер варианта	Число маяков	Расположение маяков
1	4	На полу по углам помещения
2	8	4 маяка на полу и 4 маяка на потолке по углам помещения
3	17	8 маяков на полу — по углам помещения и у стен между ними, 8 маяков на потолке — по углам помещения и у стен между ними; 1 маяк в центре потолка

30 последовательных формирований вектора измерений и оценок координат объекта.

Прямоугольниками на "стенах" и на "полу" показаны интервалы, соответствующие погрешностям оценивания координат объекта — среднеквадратичным отклонениям, определенным по значениям диагональных элементов матрицы \mathbf{D} . Из рис. 1 видно, что реальная погрешность позиционирования вполне соответствует ее априорной оценке.

Так, при расположении объекта в центре помещения на высоте 3 м (рис. 1, а) погрешность позиционирования составила около 0,5 м по "плоским" координатам и около 1 м по вертикали. При приближении объекта к маякам (рис. 1, б, в) точность определения высоты улучшается. Если объект находится на высоте 1 м (рис. 1, г, д, е) точность оценки высоты ухудшается примерно в два раза за счет изменения условий наблюдения. Пример рис. 1 показывает, что в рассмотренном помещении четырех маяков недостаточно для качественного решения задачи.

На рис. 2 показаны результаты позиционирования объекта в случае восьми маяков (расположены на потолке и на полу по углам помещения). Видно, что точность позиционирования существенно улучшилась во всех случаях, особенно при приближении объекта к маякам. Так, например, в точке $x = 1, y = 9, z = 2$ (рис. 2, е) погрешность оценки местоположения составила около 0,5 м по плоским координатам, и меньше 0,3 м по высоте. Уменьшение погрешности позиционирования идет как за счет роста числа маяков (и, соответственно, числа измерений), так и за счет улучшения условий наблюдения — маяки как бы "окружают" позиционируемый объект [32–34]. Вместе с тем, если объект находится в середине помещения (рис. 2, г) точность оценки высоты остается невысокой (около 1 м) из-за удаленности от маяков.

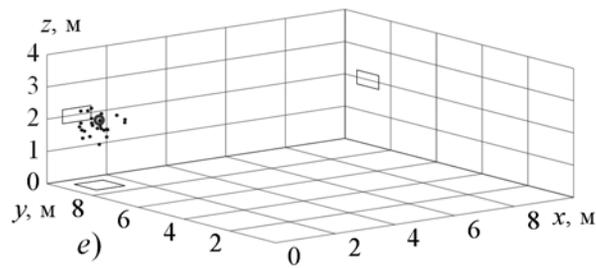
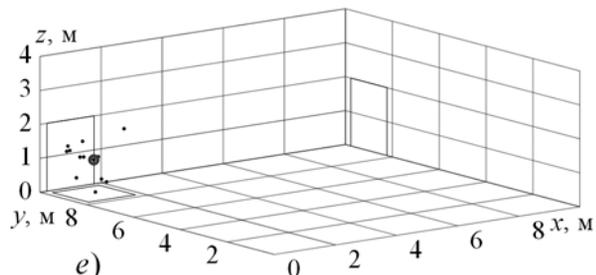
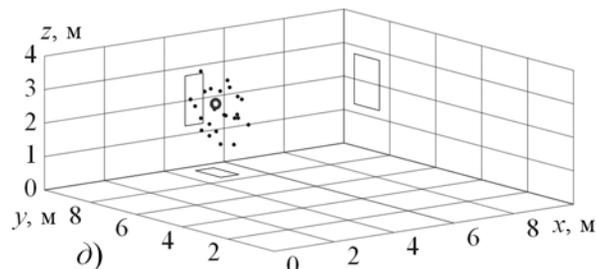
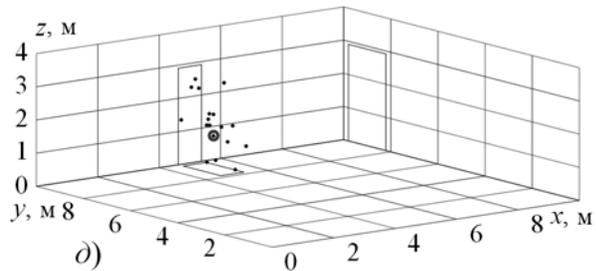
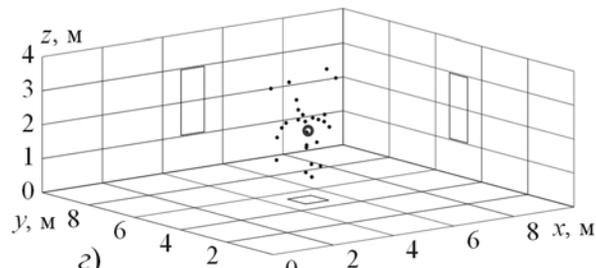
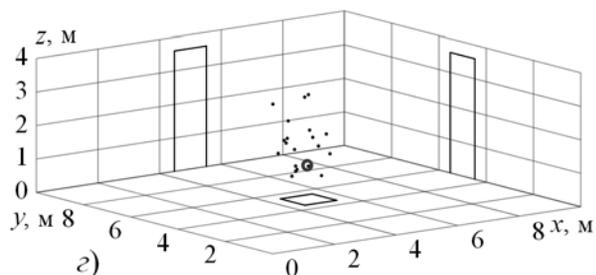
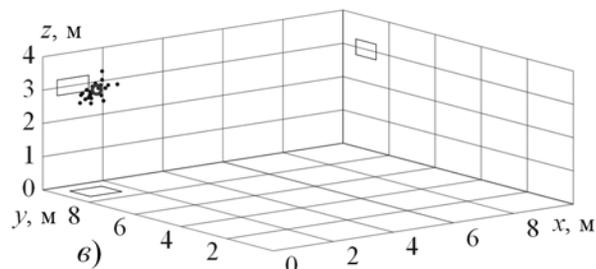
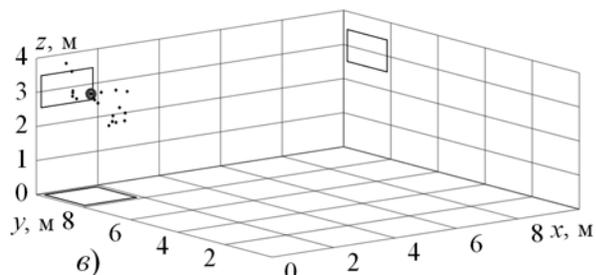
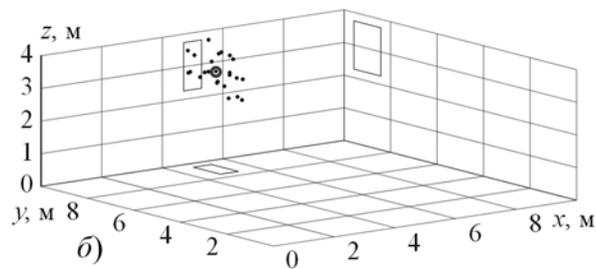
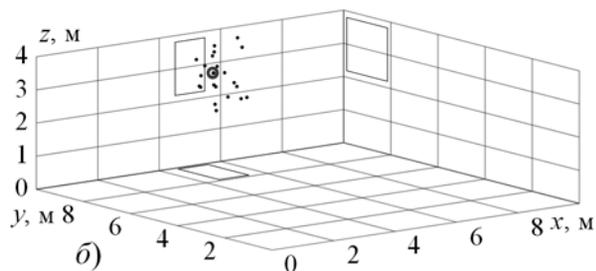
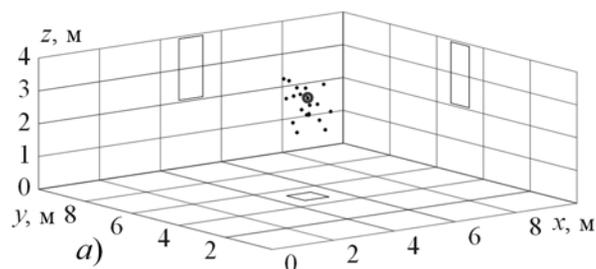
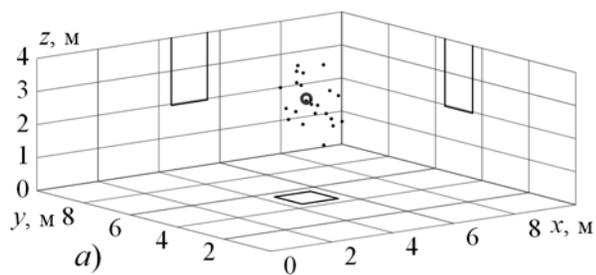


Рис. 1. Результаты позиционирования объекта для варианта 4 маяков

Рис. 2. Результаты позиционирования объекта для варианта 8 маяков

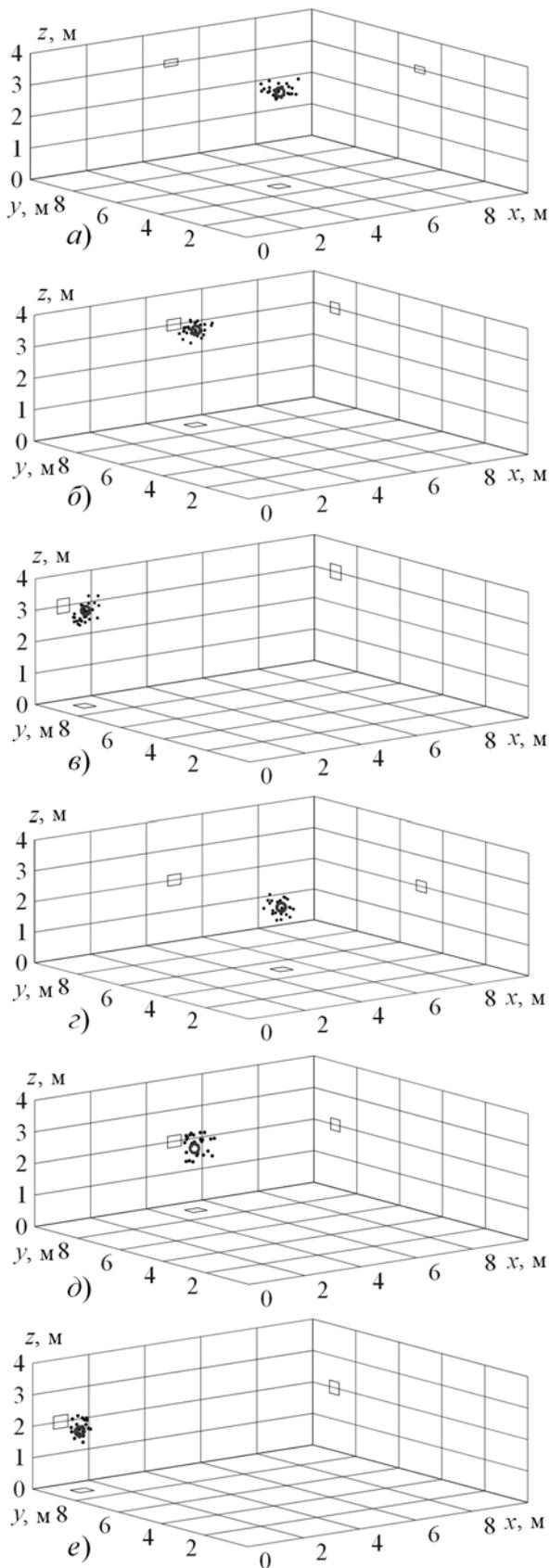


Рис. 3. Результаты позиционирования объекта для варианта 17 маяков

На рис. 3 показаны результаты позиционирования объекта в случае 17 маяков (добавлены маяки между углами на полу и потолке и дополнительно один маяк в центре потолка). Увеличение числа маяков, а главное, увеличение числа "близких" к объекту маяков существенно уменьшает погрешность оценивания по всем трем координатам. Так, при нахождении объекта в середине комнаты (рис. 3, *г*) среднеквадратичное отклонение оценки координат объекта составляет менее 0,2 м, что дает возможность безопасно позиционировать небольшой летающий дрон.

Обсуждение

Приведенные на рис. 1–3 данные показывают, что применение устройств типа Bluetooth дает возможность качественного решения 3D-задачи позиционирования на характерных дальностях "объект–маяк" 3...6 м при достаточном числе измерений и хороших условиях наблюдения (если датчики располагаются, как бы "окружая" объект).

Проектирование системы позиционирования включает в себя следующие этапы:

- задание координат Bluetooth-маяков и координат объекта;
- формирование системы уравнений (3), дополненной при необходимости линеаризованными уравнениями (2);
- вычисление диагональных элементов матрицы D ;
- если ожидаемая точность позиционирования в выбранной точке недостаточна — добавление маяков вблизи этой точки и новая оценка точности.

Предложенный способ априорной оценки погрешности позиционирования, основанный на представлениях метода наименьших квадратов, показывает хорошие результаты и вполне соответствует реальной погрешности оценивания. Представляется, что он может быть применен в случае использования любых методов позиционирования, основанных на прямых или косвенных измерениях дальностей. Еще одно направление использования предложенного способа — оценка необходимой и достаточной плотности "расстановки" опорных точек при составлении радиоотпечатка помещения (если для позиционирования используется именно этот способ). Дискретность радиоотпечатка должна соответствовать характерной погрешности решения задачи позиционирования во избежание недостатка или избыточности данных.

Рис. 1–3 были рассчитаны для случая походящегося объекта. Точность решения задачи в случае ее дополнения моделью движения объекта (3) будет в 2...4 раза ниже — в зависимости от скорости и направления движения [22–24]. Кроме того, для движущегося объекта интервал наблюдения не может быть большим (обычно он не превышает 1...2 с). С учетом ограничений на период обновления буфера данных (0,05...0,5 с) это существенно уменьшает число доступных измерений для решения задачи. В этом случае для качественного позиционирования движущихся объектов необходимо увеличение числа маяков (особенно расположенных близко к объекту), что вполне достижимо с учетом их автономности и низкой стоимости. Так, в рассмотренном на рис. 3 примере целесообразно добавить маяки (10...20 шт.), расположив их на стенах и потолке помещения.

Заключение

В работе описан способ оценки характерной погрешности определения координат для системы 3D-позиционирования внутри помещений, построенной на основе Bluetooth-маяков. Способ использует классические модельные представления задачи метода наименьших квадратов. Общей проблемой линеаризации около опорного решения является локальность его свойств. Проведенные натурные эксперименты показывают, что в рассматриваемой задаче позиционирования свойства линеаризованной модели достаточно хорошо описывают исходную нелинейную задачу. Предложенный способ позволяет спроектировать систему позиционирования, работающую с требуемой точностью.

Результаты исследования позволяют оптимистично взглянуть на перспективы решения 3D-задач позиционирования внутри помещений с помощью Bluetooth-маяков. При достаточном числе маяков и их удачной конфигурации реально достижимая точность позиционирования составляет порядка 0,2...0,3 м по всем трем координатам. Такая точность позволяет осуществлять навигацию небольших воздушных объектов типа квадрокоптеров. Предложенный подход к оценке погрешности актуален для любого способа позиционирования, основанного на измерениях дальностей "объект—маяк", в том числе и для метода радиопечатка, используемого в помещениях с большим числом стен.

1. **International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation.** URL: <http://ipin-conference.org/> (01.06.2020).
2. **Шебшаевич В. С.** Сетевые спутниковые радионавигационные системы. М.: Радио и связь, 1993. 408 с.
3. **Щекотов М. С., Кашевник А. М.** Сравнительный анализ систем позиционирования смартфонов в помещениях // Труды СПИИРАН. 2012. № 4. С. 459–471.
4. **Желамский М. В.** Особенности создания поля позиционирования для локальной навигации в закрытых пространствах // Измерительная техника. 2014. № 7. С. 40–44.
5. **Намиот Д. Е., Макарычев И. П.** Об альтернативной модели отметки местоположения в социальных сетях // International Journal of Open Information Technologies. 2020. Т.8, № 2. С. 74–90.
6. **Ассур О. С., Филаретов Г. Ф.** Разработка комплексного метода позиционирования объектов по данным беспроводных сетей Wi-Fi и устройств BLE (Bluetooth Low Energy) // Известия Института инженерной физики. 2015. № 2. С. 2–10.
7. **Мурашко И. А., Храбров Д. Е.** Методика локального позиционирования на основании Wi-Fi-сети университета // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2: Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, Вылічальная тэхніка і кіраванне. 2015. № 2. С. 119–127.
8. **Болотова С. Ю., Зонов А. В., Тютин А. П.** Навигация внутри помещений в мобильных приложениях // Программная инженерия. 2018. Т.9, № 1. С. 29–34.
9. **Дэвидсон П., Киркко-Яаккола М., Коллин Ю.3, Такала Я.** Навигационный алгоритм с использованием планов зданий и данных автономных датчиков // Гироскопия и навигация. 2015. № 1. С. 29–42.
10. **Кроненветт Н., Руппельт Я., Троммер Г. Ф.** Прецизионное позиционирование пешехода в помещении на основе контроля за стадиями его походки // Гироскопия и навигация. 2017. № 1. С. 33–48.
11. **Емельянец Г. И., Степанов А. П., Блажнов Б. А.** О решении навигационной задачи для летательных аппаратов с использованием инерциального модуля на микромеханических датчиках и наземных радиориентиров // Гироскопия и навигация. 2017. № 1. С. 3–17.
12. **Anbarasu B., Anitha G.** Indoor Scene recognition for Micro Aerial Vehicles Navigation using Enhanced SIFT-ScSPM Descriptors // The Journal of Navigation. 2020. Vol. 73, N. 1. P. 37–55.
13. **Tsai H.-Y., Hishiyama R., Kuwahara Y., Leiri Y.** Vision-Based Indoor Positioning (VBIP) — an Indoor AR Navigation System with a Virtual Tour Guide // Lecture Notes in Computer Science. 2019. Т. 11677 LNCS. P. 96–109.
14. **Gmar D. V., Dyuldina K. I., Snopko S. I., Shakhgeldyan K. J., Kryukov V. V.** Indoor navigation service based on Wi-Fi positioning // RPC 2017 — Proceedings of the 2nd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications. 2017. P. 68–71.
15. **Stepanov O. A.** Map-aided navigation, indoor navigation, and fingerprint-based positioning. Common features and differences. // 23rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2016 — Proceedings 23. 2016. P. 568–571.
16. **Воронов Р. В., Малодушев С. В.** Динамическое создание карт уровня WiFi-сигналов для систем локального позиционирования // Системы и средства информатики. 2014. Т. 24. № 1. С. 80–92.
17. **Салех Х. М., Александров Д. В.** Радиолокация с использованием Wi-Fi-точек доступа беспроводных сетей внутри помещений // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10, № 7. С. 29–36.
18. **Булычев В. Ю., Булычев Ю. Г., Ивакина С. С., Насенков И. Г., Николас П. И., Чепель Е. Н.** Обоснование методов оптимального оценивания параметров движения цели в триангуляционной измерительной системе // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2015. № 4. С. 94.

19. Васильев К. К., Бобков А. В. Динамическое использование ориентиров для оценки координат автономных необитаемых подводных аппаратов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2017. № 12. С. 11–14.
20. Мартынюк М. В., Генералов А. В., Наумов С. С., Залетнов С. Е., Дмитриев Д. В., Тимофеева О. П. Разработка системы локального акустического позиционирования на базе персонального компьютера // Измерительная техника. 2015. № 10. С. 68–71.
21. Grinyak V. M., Devyatisilnyi A. S. Dynamic adjustment of multiposition observing system with respect to trajectory measurements // Journal of Computer and Systems Sciences International. 1999. Vol. 38, N. 1. С. 124–130.
22. Гриняк В. М., Девятисильный А. С., Шурыгин А. В. Оценка возможностей использования Bluetooth-устройств для навигации внутри помещений // Информационные технологии. 2018. Т. 24, № 9. С. 610–617.
23. Гриняк В. М., Девятисильный А. С., Люлько В. И., Цыбанов П. А. Возможности позиционирования внутри помещений с помощью Bluetooth устройств // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2018. Т. 6, № 2 (21). С. 132–143.
24. Гриняк В. М., Гриняк Т. М., Цыбанов П. А. Позиционирование внутри помещений с помощью Bluetooth-устройств // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. 2018. Т. 10, № 2 (41). С. 137–147.
25. Попп М., Профет С., Шольц Г., Троммер Г. Ф. Новая система навигации и наведения микролетательных аппаратов, способных беспрепятственно проникать в здания // Гирокоспия и навигация. 2015. № 2 (89). С. 3–17.
26. Motley A. J., Keenan J. M. P. Personal communication radio coverage in buildings at 900 MHz and 1700 MHz // Electronics Letters. 1988. Vol. 24, N. 12. P. 763–764.
27. Гриняк В. М. Исследование пространственной задачи навигации в условиях неполной измерительной информации // Дальневосточный математический журнал. 2000. Т. 1, № 1. С. 93–101.
28. Гриняк В. М., Гриняк Т. М., Иваненко Ю. С. Динамическая выставка многопозиционной системы наблюдения // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2017. № 3 (18). С. 12.
29. Малышев А. Н. Введение в вычислительную линейную алгебру. Новосибирск: Наука, 1991.
30. Крыжко И. Б., Глушакова Т. Н. Численное исследование разрешимости обратных траекторных задач // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2007. № 1. С. 148–151.
31. SKYLAB Low Power Consumption Waterproof Bluetooth beacon-VG02. URL: <http://www.skylabmodule.com/skylab-low-power-consumption-waterproof-bluetooth-eddystone-nordic-chip-set-beacon-itag-bluetooth-beacon-vg02/> (01.06.2020).
32. Dulimarta H. S., Jain A. K. Mobile robot localization in indoor environment // Pattern Recognition. 1997. Vol. 30, N. 1. С. 99–111.
33. Ranganathan P., Hayet J. B., Devy M., Hutchinson S., Lerasle F. Topological navigation and qualitative localization for indoor environment using multi-sensory perception // Robotics and Autonomous Systems. 2002. Vol. 41, N. 2–3. С. 137–144.
34. Барабанова Л. П. О геометрическом факторе разностно-дальномерного позиционирования с минимальным числом маяков // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2005. № 3. С. 89–96.

V. M. Grinyak, Ph.D. (Tech.), Professor,
Vladivostok State University of Economics and Service, Vladivostok, Russian Federation

Configuration of 3D Indoor Positioning System Based on Bluetooth Beacons

This paper devoted to research of indoors navigation problems under poor or insufficient quality of satellite navigational data environment. The problem of object positioning in 3D space by Bluetooth devices located indoors forming a multi-position tracking system is considered in this research. Emphasized that in order to succeed for such system it is required to pre-estimate distinctive accuracy. The proposed model interpretation of the positioning problem as the system of linear equations. The classic model interpretation for method of least squares is used for resolution. General problem of linearization around reference resolution is the locality of its features. There are three concepts of problems solvability, such as fundamental solvability (observability), solvability in conditions of instrumental measurement errors and solvability under conditions of finite accuracy of computation on a computer. The first aspect of solvability is interpreted by the completeness of the rank of the corresponding system of linear algebraic equations, the second and third ones represents by the conditionality of the problem and the convergence of the iterative estimation procedure. The conducted experiments show that for the positioning problem the attributes of the linearized model are accurate enough to represent the original nonlinear problem. Such interpretation allows to build theoretical accuracy estimation priors for object coordinates evaluations and to identify the areas with insufficient positioning accuracy. In this paper there are results of expected accuracy evaluation for various system patterns with full-scale experiments proving the theoretical calculations. Experiments for problems with using SKYLAB Beacon VG01 Bluetooth transmitters and smartphone HUAWEI WAS-LX1 are presented and confirmed that math model with linear approximation defined by authors is usable for solving indoors navigation problems using Bluetooth signal. So, for good enough quantity and appropriate location of the tracks the achievable positioning accuracy could be as good as 0.2–0.3 meters for all three coordinates. Such accuracy allows to navigate small hovering objects such as drones. In general, it looks promising to use Bluetooth trackers for solving positioning problems for indoors environments.

Keywords: information system, indoor positioning, beacons, Bluetooth, location, least squares method

DOI: 10.17587/it.27.32-40

References

1. **International** Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, available at: <http://ipin-conference.org/> (date of access 01.06.2020).
2. **Shebshaevich V. S.** Network satellite radio navigation systems), Moscow, Radio i svjaz', 1993, 408 p. (in Russian).
3. **Shchekotov M., Kashevnik A.** Comparative Analysis of Indoor Positioning Systems for Smartphones, *Proc. FRUCT Conf.*, 2012, pp. 43–48 (in Russian).
4. **Zhelamskii M. V.** Features of the Construction of a Positioning Field for Local Navigation in Enclosed Spaces, *Measurement Techniques*, 2014, vol. 57, no. 7, pp. 791–799 (in Russian).
5. **Namiot D., Makarychev I.** On the alternative model of location marking on social networks, *International Journal of Open Information Technologies*, 2020, vol. 8, no. 2, pp. 74–90.
6. **Assur O. S., Filaretov G. F.** Razrabotka kompleksnogo metoda pozicionirovaniya ob'ektov po dannym besprovodnyh setej Wi-Fi i ustrojstv BLE (Bluetooth Low Energy), *Izvestiya Instituta Inzhenernoj Fiziki*, 2015, no. 2, pp. 2–10 (in Russian).
7. **Murashko I. A., Khrabrov D. E.** Methods of local positioning based on Wi-Fi-network of university, *Vesnik Grodzenskaga dzjarzhaj'naga y'niversitjeta imja Janki Kupaly. Seriya 2: Matjematyka. Fizika. nfarmatyka, Vylichal'naja tjehnika i kiravanne*, 2015, no. 2, pp. 119–127 (in Russian).
8. **Bolotova S. Yu., Zonov A. V., Tutin A. P.** Indoor Navigation in Mobile Applications, *Programmnaya Injeneriya*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 29–34 (in Russian).
9. **Davidson P., Kirkko-Jaakkola M., Collin J., Takala J.** Navigation Algorithm Combining Building Plans with Autonomous Sensor Data, *Gyroscopy and Navigation*, 2015, no. 3, pp. 188–196 (in Russian).
10. **Kronenwett N., Ruppelt J., Trommer G. F.** Motion Monitoring based on a Finite State Machine for Precise Indoor Localization, *Gyroscopy and Navigation*, 2017, no. 3, pp. 190–199 (in Russian).
11. **Emel'yantsev G. I., Stepanov A. P., Blazhnov B. A.** Solution of Aircraft Navigation Problem using MEMS IMU and Ground Radio Sources, Gyroscopy and Navigation (*Giroskopija i navigacija*), 2017, no. 1, pp. 3–17 (in Russian).
12. **Anbarasu B., Anitha G.** Indoor Scene recognition for Micro Aerial Vehicles Navigation using Enhanced SIFT-ScSPM Descriptors, *The Journal of Navigation*, 2020, vol. 73, no. 1, pp. 37–55.
13. **Tsai H.-Y., Hishiyama R., Kuwahara Y., Leiri Y.** Vision-Based Indoor Positioning (VBIP) — an Indoor AR Navigation System with a Virtual Tour Guide, *Lecture Notes in Computer Science*, 2019, vol. 11677 LNCS, pp. 96–109.
14. **Gmar D. V., Dyuldina K. I., Snopko S. I., Shakhgeldyan K. J., Kryukov V. V.** Indoor navigation service based on Wi-Fi positioning, *RPC 2017 — Proceedings of the 2nd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications*, 2017, pp. 68–71.
15. **Stepanov O. A.** Map-aided navigation, indoor navigation, and fingerprint-based positioning. Common features and differences, *23rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2016 — Proceedings 23*, 2016, pp. 568–571.
16. **Voronov R. V., Malodushev S. V.** Dynamic Creation Of Wi-Fi-Signal Level Maps For Location Systems, *Systems and Means of Informatics*, 2014, no. 1, pp. 80–92 (in Russian).
17. **Saleh H. M., Aleksandrov D. V.** Indoor positioning using WI-FI-access points, *Informatsionno-Izmeritelnye i Upravlyaushie Systemy*, 2012, vol. 10, no. 7, pp. 29–36.
18. **Bulychev V. Y., Bulychev Y. G., Ivakina S. S., Nasenkov I. G., Nikolas P. I., Chepel E. N.** Substantiation of methods for optimal estimation of target motion parameters in triangulation location systems, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2015, vol. 54, no. 4, pp. 593–608.
19. **Vasiliev K. K., Bobkov A. V.** Dynamic use landmarks for coordinates estimation, *Informatsionno-Izmeritelnye i Upravlyaushie Systemy*, 2017, no. 12, pp. 11–14 (in Russian).
20. **Martynyuk M. V., Generalov A. V., Naumov S. S., Zaletnov S. E., Dmitriev D. V., Timofeeva O. P.** Development of A System Of Local Acoustic Positioning Based On A Personal Computer, *Measurement Techniques*, 2016, no. 10, pp. 1179–1184.
21. **Grinyak V. M., Devyatisilnyi A. S.** Dynamic adjustment of multiposition observing system with respect to trajectory measurements, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 1999, vol. 38, no. 1, pp. 124–130.
22. **Grinyak V. M., Devyatisilny A. S., Shurygin A. V.** Feasibility Study of Indoor Navigation with Bluetooth Beacons, *Informatsionnye Tehnologii*, 2018, vol. 24, no. 9, pp. 610–617.
23. **Grinyak V. M., Devyatisilnyi A. S., Lulko V. I., Tsibanov P. A.** Indoor positioning system based on Bluetooth beacons, *Modelirovanie, Optimizacija i Informacionnye Tehnologii*, 2018, vol. 6, no. 2 (21), pp. 132–143 (in Russian).
24. **Grinyak V. M., Grinyak T. M., Tsibanov P. A.** Indoor positioning system based on Bluetooth beacons, *The Territory of New Opportunities. The Herald of Vladivostok State University of Economics*, 2018, vol. 10, no. 2 (41), pp. 137–147 (in Russian).
25. **Popp M., Prophet S., Scholz G., Trommer G. F.** A novel guidance and navigation system for MAVs capable of autonomous collision-free entering of buildings, *Gyroscopy and navigation*, 2015, no. 3, pp. 3–17 (in Russian).
26. **Motley A. J., Keenan J. M. P.** Personal communication radio coverage in buildings at 900 MHz and 1700 MHz, *Electronics Letters*, 1988, vol. 24, no. 12, pp. 763–764.
27. **Grinyak V. M.** Spatial navigation problem under incomplete measuring information conditions, *Dalnevostochnyi matematicheskij jurnal*, 2000, vol. 1, no. 1, pp. 93–101 (in Russian).
28. **Grinyak V. M., Grinyak T. M., Ivanenko Y. S.** Dynamic Adjustment of Multiposition Observing System, *Modelirovanie, Optimizacija i Informacionnye Tehnologii*, 2017, no. 3, pp. 12 (in Russian).
29. **Malyshev A. N.** Introduction to computing linear algebra, Novosibirsk, Nauka, 1991 (in Russian).
30. **Kryzhko I. B., Glushakova T. N.** On solvability of the inverse trajectory problems, *Vestnik voronejskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyi analiz i informatsionnye tehnologii*, 2007, no. 1, pp. 148–151 (in Russian).
31. **SKYLAB** Low Power Consumption Waterproof Bluetooth beacon — VG02. URL: <http://www.skylabmodule.com/skylab-low-power-consumption-waterproof-bluetooth-eddystone-nordic-chipset-beacon-itag-bluetooth-beacon-vg02/> (date of access 01.06.2020)
32. **Dulimarta H. S., Jain A. K.** Mobile robot localization in indoor environment, *Pattern Recognition*, 1997, vol. 30, no. 1, pp. 99–111.
33. **Ranganathan P., Hayet J. B., Devy M., Hutchinson S., Lerasle F.** Topological navigation and qualitative localization for indoor environment using multi-sensory perception, *Robotics and Autonomous Systems*, 2002, vol. 41, no. 2–3, pp. 137–144.
34. **Barabanova L. P.** On the geometric factor of difference range positioning with a minimal number of beacons, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2005, vol. 44, no. 3, pp. 413–420.

В. А. Комаров, канд. техн. наук, доц., e-mail: VKomarov@iss-reshetnev.ru,
АО "Информационные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнева",

А. В. Сарафанов, д-р техн. наук, проф., e-mail: Sarafanov@i-teco.ru,
ООО "Витте Консалтинг" (ГК "АЙ-ТЕКО"),

С. Р. Тумковский, д-р техн. наук, проф., e-mail: STumkovskiy@hse.ru,
Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", г. Москва

Опыт цифровой трансформации бизнес-процессов прикладных экспериментальных исследований посредством мультиарендности их ресурсного обеспечения

Рассматриваются направления и результаты применения многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем как средств автоматизации экспериментальных исследований в ряде прикладных областей. Проведена оценка эффективности трансформации бизнес-процессов на основе их формализованных моделей и комплекса качественных показателей.

Ключевые слова: цифровая трансформация, сквозные цифровые технологии, бизнес-процесс, экспериментальные исследования, испытания, эффективность, лабораторное оборудование, распределенные измерительно-управляющие системы, мультиарендность, e-learning, laboratory as a service

Введение

Развитие цифровой экономики в России связано, в том числе, с решением проблемы модернизации материально-технической и технологической баз отраслей промышленности и отраслевой системы подготовки кадров. Такая модернизация осуществляется на основе внедрения сквозных цифровых технологий [1–9]. Одной из таких технологий в рамках Интернета вещей является технология эксплуатации испытательного, научно-исследовательского и лабораторного оборудования на основе концепции мультиарендности [10, 11]. Данная технология реализуется на базе компьютерных измерительных технологий и активно развивающейся сетевой инфраструктуры — многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем (МРИУС) и их прикладного применения [12–18]. Исследованием, разработкой и внедрением таких систем, а также отдельных их компонентов в указанном выше разрезе авторы статьи занимаются более 10 лет. Опыт внедрения МРИУС применительно к задачам автоматизации экспериментальных исследований в ряде отраслей народного хозяйства (промышленности, науке, образовании) показывает, что полученный в МРИУС синергетический эффект при интеграции современных технологий способствует глубокой трансформации операционных процессов (бизнес-процессов, БП), реализуемых с их применением.

В статье рассматривается опыт такой трансформации в разрезе процессно-ориентированного подхода при решении следующих прикладных задач в области радиоэлектронного приборостроения:

- испытания бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов;
- формирование эксплуатационной загрузки бортового ретрансляционного комплекса космического аппарата (КА);
- подготовка и переподготовка кадров радио-технического и приборостроительного профилей.

Модернизация процедуры наземной экспериментальной отработки бортовой радиоэлектронной аппаратуры

Повышение функциональной сложности и плотности создаваемой радиоэлектронной аппаратуры для бортовых комплексов управления КА, широкое использование в ней встроенных вычислительных модулей обусловило резкое увеличение объема ее наземной экспериментальной отработки вследствие появления дополнительной составляющей — специализированного программного обеспечения (СПО). Как правило, проектируемая аппаратура создается на основе магистрально-модульного исполнения [19] и включает в свой состав вычислительный модуль (ВМ), его СПО и комплекс интерфейсных

модулей сопряжения (ИМС), предназначенных для обеспечения взаимодействия ВМ с соответствующими узлами, агрегатами и системами КА [14, 15, 20]. Проведение автономной отработки СПО выполняется на технологическом образце ВМ, функционально идентичном его "летному" варианту исполнения, и требует создания специализированного стенда для формирования на его интерфейсах совокупности сигналов, которые обеспечивают эмуляцию внешних условий работы ВМ в составе прибора и КА на основе специализированных технических средств (устройств цифрового и аналогового ввода/вывода, контроллеров интерфейсов и пр.) [20].

На рис. 1 приведена укрупненная модель сквозного БП создания вновь проектируемой бортовой радиоэлектронной аппаратуры в виде диаграммы BPMN (*Business Process Model and Notation*).

Представленная модель БП (*As-Is*) имеет следующие существенные недостатки [20]:

- ограниченная информативность процесса автономной отработки СПО в связи с невозможностью обеспечить полную эмуляцию внешних условий при разумных временных и материальных затратах на стенд автономной отработки (блоки 6—8), что обуславливает необходимость дополнительной модификации СПО посредством внесения точек остановки и, как следствие, наличие функциональных ограничений на отработку некоторых веток алгоритма (переключение на основной/резервный комплект ИМС, работа при частичной/полной неисправности ИМС и др.);
- недостаточный уровень унификации применяемых технических средств эмуляции при создании уникального образца стенда автономной отработки СПО под конкретный экземпляр аппаратуры, обуславливающий повышенные материальные затраты (блок 5).

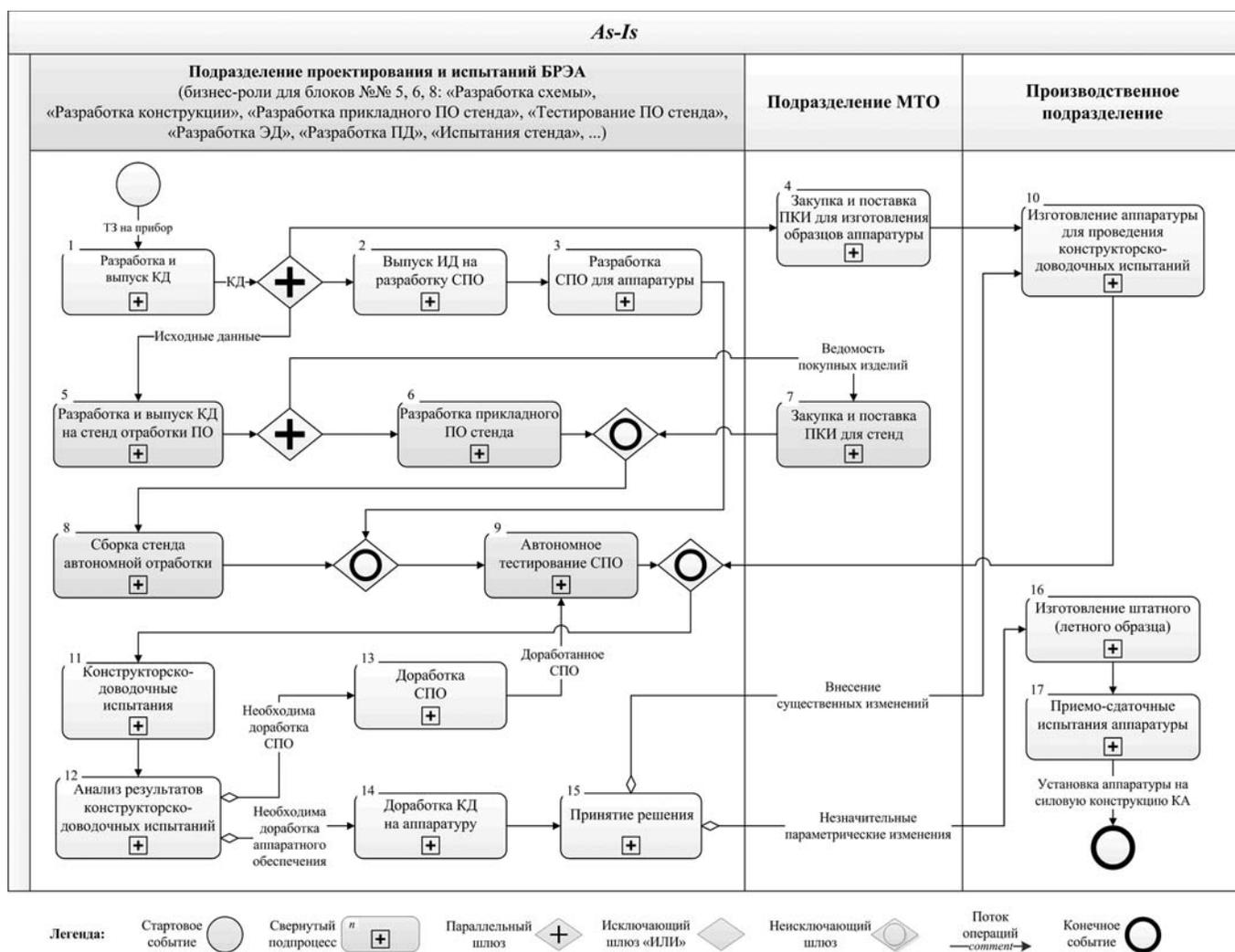


Рис. 1. Укрупненная модель сквозного БП создания аппаратуры бортового комплекса управления КА:

ПКИ — покупные комплектующие изделия; КД — конструкторская документация; ЭД — эксплуатационная документация; ПД — программная документация; МТО — материально-техническое обеспечение

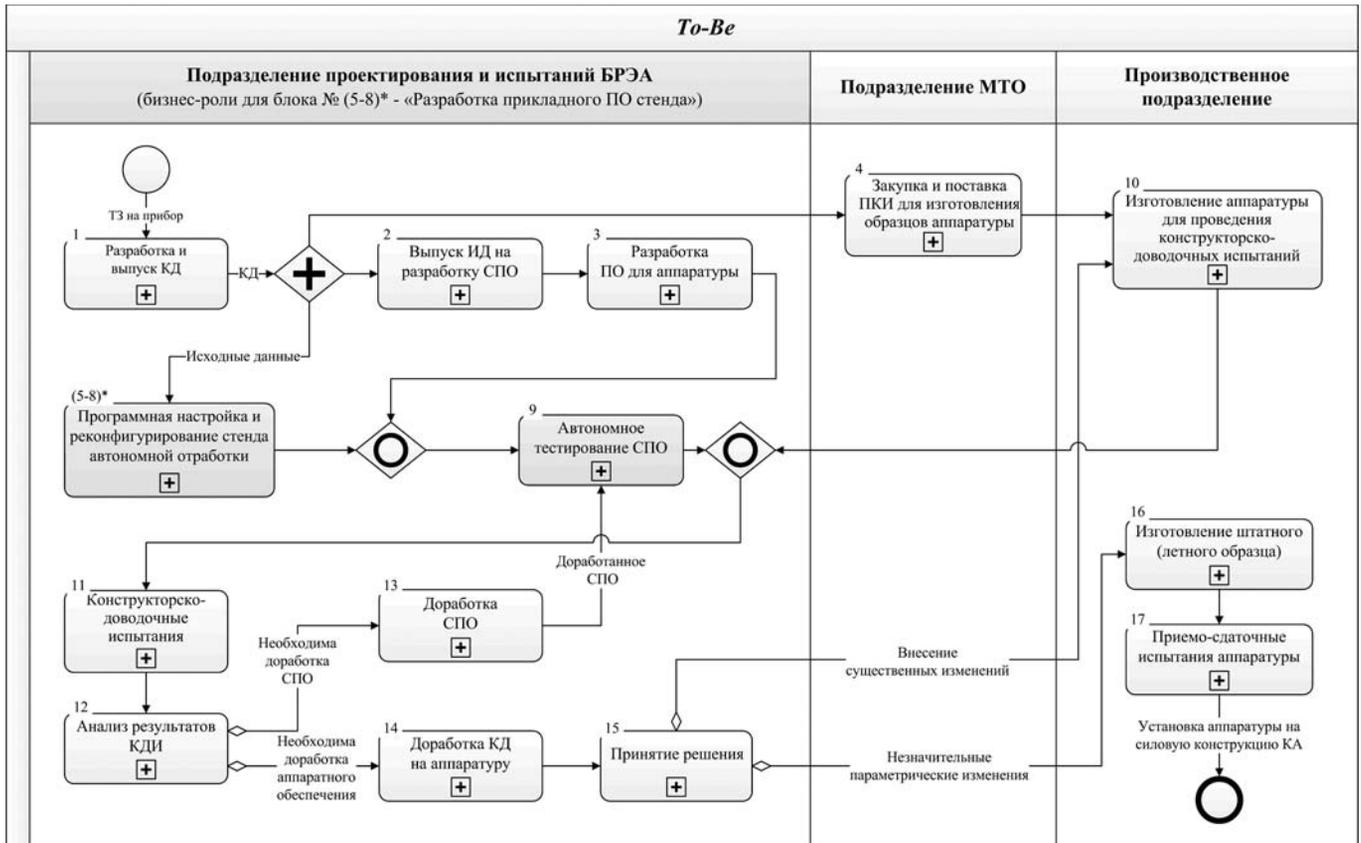


Рис. 2. Модель трансформированного сквозного БП создания аппаратуры бортового комплекса управления КА

Данные факторы в целом характеризуют недостаточное качество процесса автономной отработки СПО (блок 9) и ведут к увеличению числа обратных проектных связей, связанных с его итерационной доработкой (блоки 12, 13).

Для решения задачи обеспечения автономной отработки СПО ВМ был разработан и создан промышленный образец МРИУС, эмулирующий функции обработки команд управления и измерительной информации нескольких ИМС на основе одной платы реконфигурируемого цифрового ввода/вывода, управляемой посредством специализированной ЭВМ, а также набор базовых функциональных моделей основных типов ИМС на ПЛИС [14, 15]. С использованием созданного образца эмуляция компонентов внешнего окружения ВМ в виде его ИМС осуществляется посредством компоновки на ПЛИС платы реконфигурируемого цифрового ввода/вывода базовых функциональных моделей ИМС, их параметрического конфигурирования (настройка адресов, алгоритмов преобразования команд управления и пр.) и модификации соответствующего прикладного программного модуля управления ими. Это, в свою очередь, повлекло "трансформацию" сквозного БП соз-

дания бортовой радиоэлектронной аппаратуры для более чем десяти КА различного функционального назначения (связи и телевидения, ретрансляции, навигации и др.) (рис. 2).

Сравнительный анализ исходного и трансформированного БП создания аппаратуры представлен в виде лепестковой диаграммы на рис. 3. Данное техническое решение обеспечи-



Рис. 3. Сравнительная диаграмма параметров процессов создания бортовой радиоэлектронной аппаратуры бортового комплекса управления КА:

1 — исходный БП; 2 — модифицированный БП

ло расширение в 2...3 раза перечня обрабатываемых режимов работы аппаратуры, а также снижение в несколько раз затрат на создание стенда для обработки СПО ВМ за счет [14, 15]:

- сокращения в 3 и более раз номенклатуры и объема применяемых технических средств;
- сокращения на 10...15 % объема КД, разрабатываемой и выпускаемой подразделением;
- реализованной возможности гибких оперативных программных настройки и реконфигурирования стенда на основе МРИУС;
- уменьшения в несколько раз числа задействованных при создании и эксплуатации стенда бизнес-ролей. Вместо ролей "Разработка схемы", "Разработка конструкции", "Тестирование ПО стенда", "Разработка ЭД", "Разработка ПД", "Испытания стенда", "Разработка прикладного ПО стенда" (см. рис. 1) задействуется только последняя, которая модифицируется с точки зрения выполняемых бизнес-функций.

В трансформированном процессе (*To-Be*) автономного тестирования СПО ВМ для каждого образца аппаратуры формируются параметры конфигурации стенда автономной обработки, включающие проект и файл прошивки ПЛИС, а также наборы значений соответствующих настроек, которые совместно с финальной версией СПО ВМ и результатами проведенных проверок в дальнейшем хранятся в течение всего жизненного цикла аппаратуры. Таким образом, в процессе эксплуатации КА в случае необходимости обеспечивается возможность создания "цифрового двойника" функционального поведения конкретного образца аппаратуры посредством оперативного реконфигурирования разработанного и созданного эмулятора ИМС и стенда в целом на его основе. Применение такого "цифрового двойника" также существенно упростило в организационном плане сопровождение процесса эксплуатации созданной аппаратуры и снизило в несколько раз материальные затраты на обеспечение процедуры моделирования возникающих неисправностей, а также упростило процедуру обработки программных "заплаток" для парирования неисправностей в течение всего срока активного существования КА на орбите (10...15 лет).

Формирование эксплуатационной загрузки бортового ретрансляционного комплекса космического аппарата

Одной из составляющих этапа жизненного цикла КА связи и ретрансляции геостационарной орбиты является формирование эксплуатационной загрузки его бортового ретрансляционного комплекса (БРК) посредством проведения квалификационных испытаний земных станций (ЗС) операторов услуг на предмет их допуска к работе через БРК [16, 17]. Фрагмент укрупненной модели такого БП в виде *IDEF₀*-диаграммы (*Integration definition for function modeling*) представлен на рис. 4.

Проведенный анализ исходного (*As-Is*) БП показал высокие временные затраты на формирование эксплуатационной загрузки БРК при традиционном подходе к проведению квалификационных испытаний ЗС, которые в ряде случаев могут достигать 10 % и более от общего срока активного существования КА (рис. 4, блок А12), что, в свою очередь, снижает его коммерческую эффективность [17].

Повышение производительности работ при выполнении процедуры испытаний ЗС и сокращение их общей длительности реализуется посредством организации на основе МРИУС параллельного доступа и возможности работы операторам измерительной станции с ее оборудованием с нескольких (*m*) рабочих мест. Данный подход позволяет проводить испытания нескольких ЗС, работающих с частотным

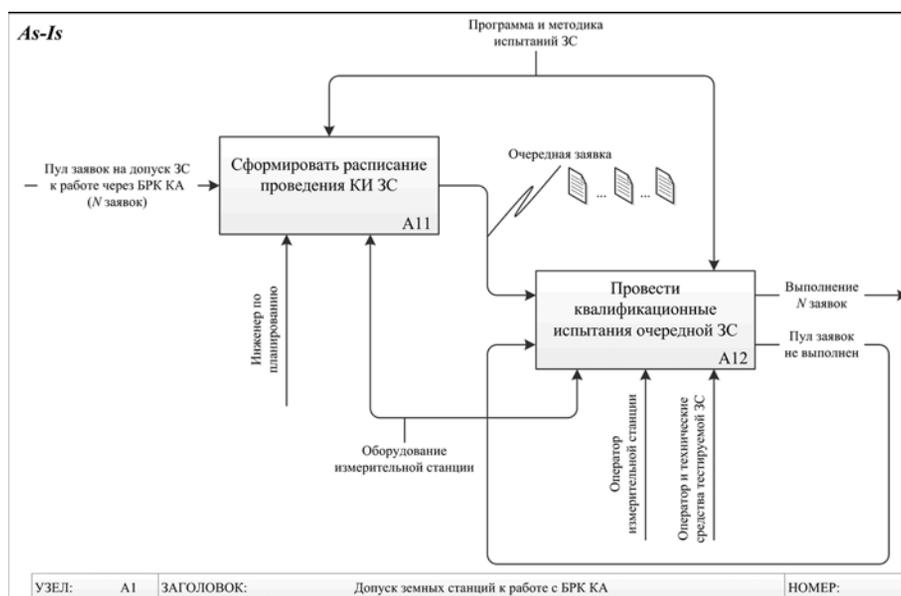


Рис. 4. Фрагмент *IDEF₀*-диаграммы исходного БП измерения параметров ЗС и их допуска к работе через БРК в Центре управления КА

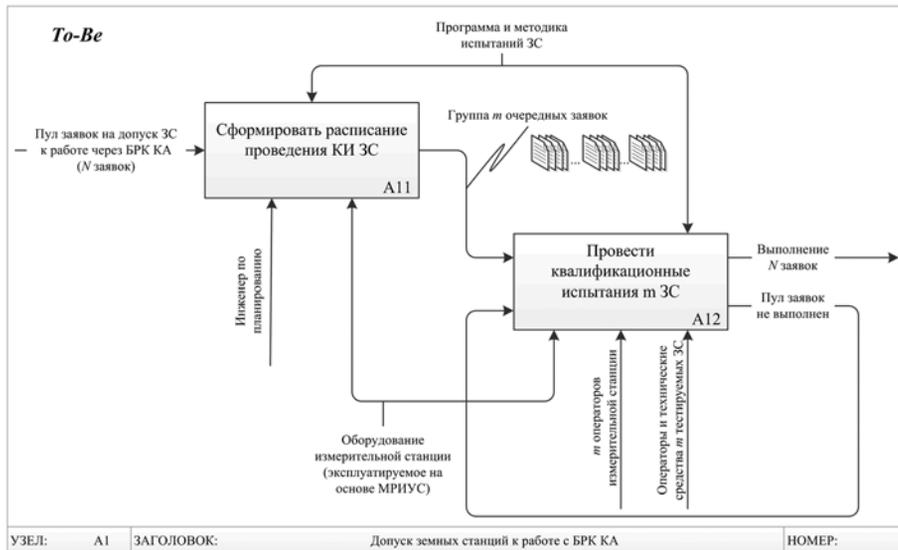


Рис. 5. Фрагмент IDEF₀-диаграммы трансформированного измерения параметров ЗС и их допуска к работе через БРК в Центре управления КА

разделением через БРК, параллельно, используя один комплект оборудования измерительной цепи [16]. Фрагмент модели трансформированного БП (*To-Be*) приведен на рис. 5.

Обеспечение возможности проведения квалификационных испытаний m станций параллельно (рис. 5, блок A12) приводит к пропорциональному повышению производительности работ и соответствующему сокращению общей длительности этапа формирования эксплуатационной загрузки КА, которое зависит от числа организованных рабочих мест в МРИУС (5...8 и более), технических характеристик БРК КА и его планируемой эксплуатационной загрузки. Более подробно соответствующие аналитические соотношения и зависимости рассмотрены в работе [17]. Сравнительная обобщенная оценка изменений основных параметров исходного и трансформированного БП приведена



Рис. 6. Сравнительная диаграмма параметров процессов допуска земных станций к работе с БРК КА:

1 — традиционный БП; 2 — модифицированный БП

в виде лепестковой диаграммы на рис. 6. Бизнес-роли штатных единиц, задействованных в реализации БП, не изменились, но при этом увеличилась частота их исполнения (согласно числу развернутых рабочих мест).

Сокращение длительности этапа квалификационных испытаний ЗС в целом позволяет повысить коммерческую эффективность КА за счет увеличения до 10 % и более возможной длительности предоставления услуг аренды операторам косвенных космических услуг и соответственно повысить конкурентоспособность КА в течение ограниченного срока его активного существования [17].

Автоматизация экспериментальных исследований в отраслевой системе подготовки кадров

Процесс проведения лабораторных экспериментальных исследований при подготовке и переподготовке современных кадров в области техники и технологий основывается на применении высокотехнологического экспериментального оборудования (исследовательские стенды, лабораторные макеты и установки). Комплектование таким оборудованием специализированных лабораторий и последующая организация на их основе лабораторных исследований является достаточно сложной в организационном плане задачей, требующей соответствующего финансового обеспечения [12, 13]. При этом организация на базе таких лабораторий необходимого числа рабочих мест (10...15), укомплектованных современным оборудованием (экспериментальное оборудование в комплекте с ПЭВМ), обладает рядом существенных недостатков, сдерживающих применение современных методов электронной педагогики. К таким недостаткам следует отнести:

1. Доступ к ресурсам специализированной лаборатории осуществляется только по расписанию из одной локации — непосредственно из самой лаборатории.

2. Низкая пропускная способность экспериментального оборудования (монопольный режим эксплуатации, простои в ночное время, в выходные и праздничные дни).

3. Достаточно высокие затраты на поддержание инфраструктуры такой лаборатории в рабочем состоянии.

Два первых недостатка сдерживают, а в ряде случаев исключают возможность проведения эффективных экспериментальных лабораторных исследований на реальном оборудовании с применением *LMS*-систем (*learning management system*), в которых заложена реализация концепции обучения "В удобное время в любом месте", и приводят к существенным ограничениям мобильности обучающихся.

Третий недостаток связан с необходимостью на системной основе поддерживать в рабочем состоянии экспериментальное оборудование, проводить мероприятия по ремонту помещения, обеспечению его электро- и пожаробезопасности, содержать штат учебно-вспомогательного персонала и т. п.

В укрупненном виде фрагмент модели традиционного процесса проведения лабораторных экспериментальных исследований в виде *IDEF₀*-диаграммы приведен на рис. 7. Из диа-

граммы видно, что как процесс подготовки (блок A11), так и процесс выполнения лабораторных исследований (блок A12) выполняется из одной локации — специализированной лаборатории. При этом экспериментальное оборудование (все рабочие места) используется в монопольном режиме согласно расписанию. Применение МРИУС (рис. 8) позволяет исключить данные недостатки. Концепция мультиадресности, заложенная в МРИУС, позволяет расширить число локаций доступа к экспериментальному оборудованию. В общем случае каждый обучающийся может получить удаленный доступ к стендам из своей локации (блок A11 и A12 на рис. 8) или из любого доступного на момент проведения лабораторных исследований компьютерного класса. Кроме этого, экспериментальное оборудование переводится из монопольного в многопользовательский режим эксплуатации. Это позволяет на 1...1,5 порядка сократить число единиц оборудования. При этом появившаяся возможность реализации в *LMS*-системах принципа "В удобное время

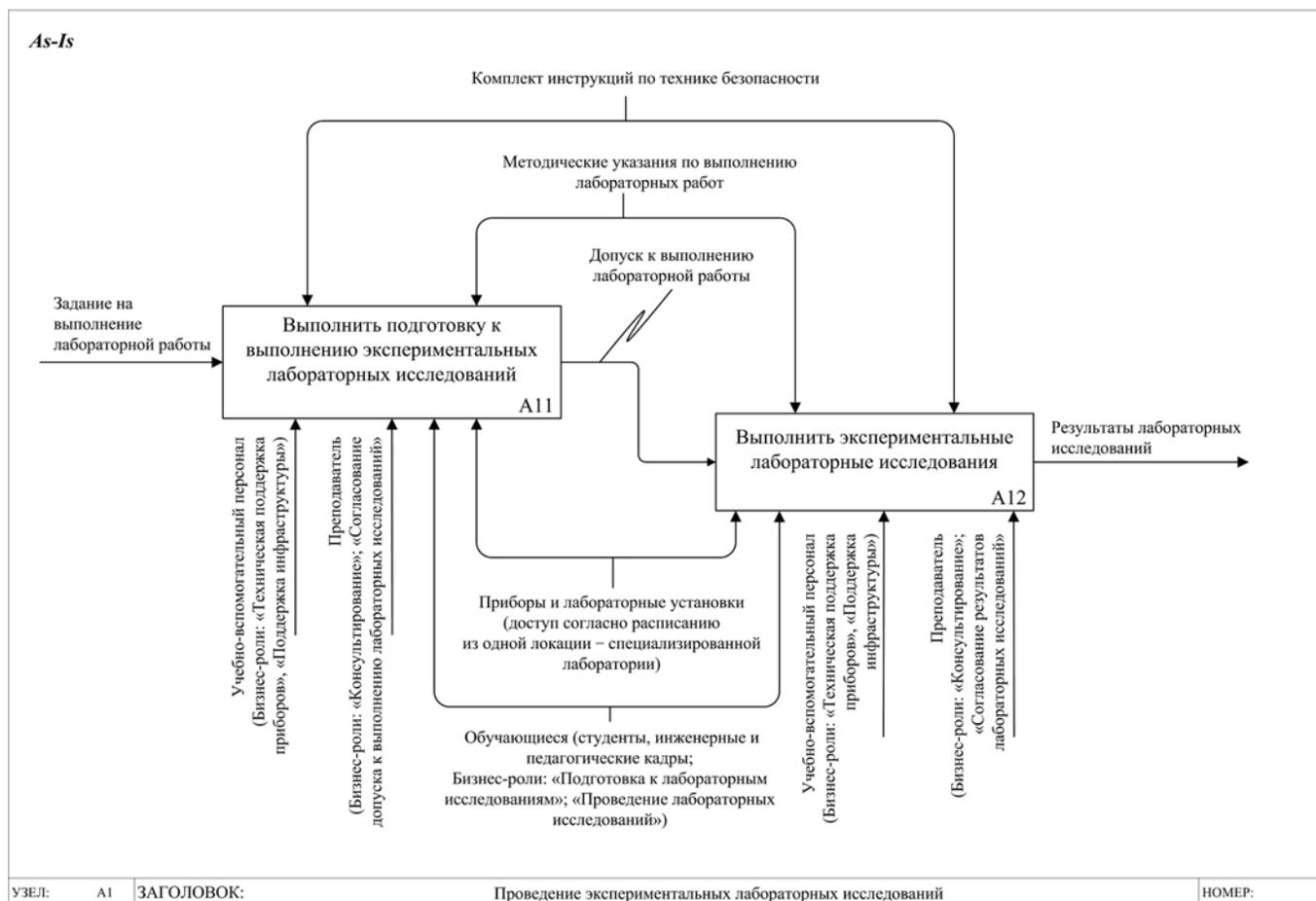


Рис. 7. Фрагмент *IDEF₀*-диаграммы традиционного БП проведения лабораторных экспериментальных исследований в отраслевой системе подготовки кадров

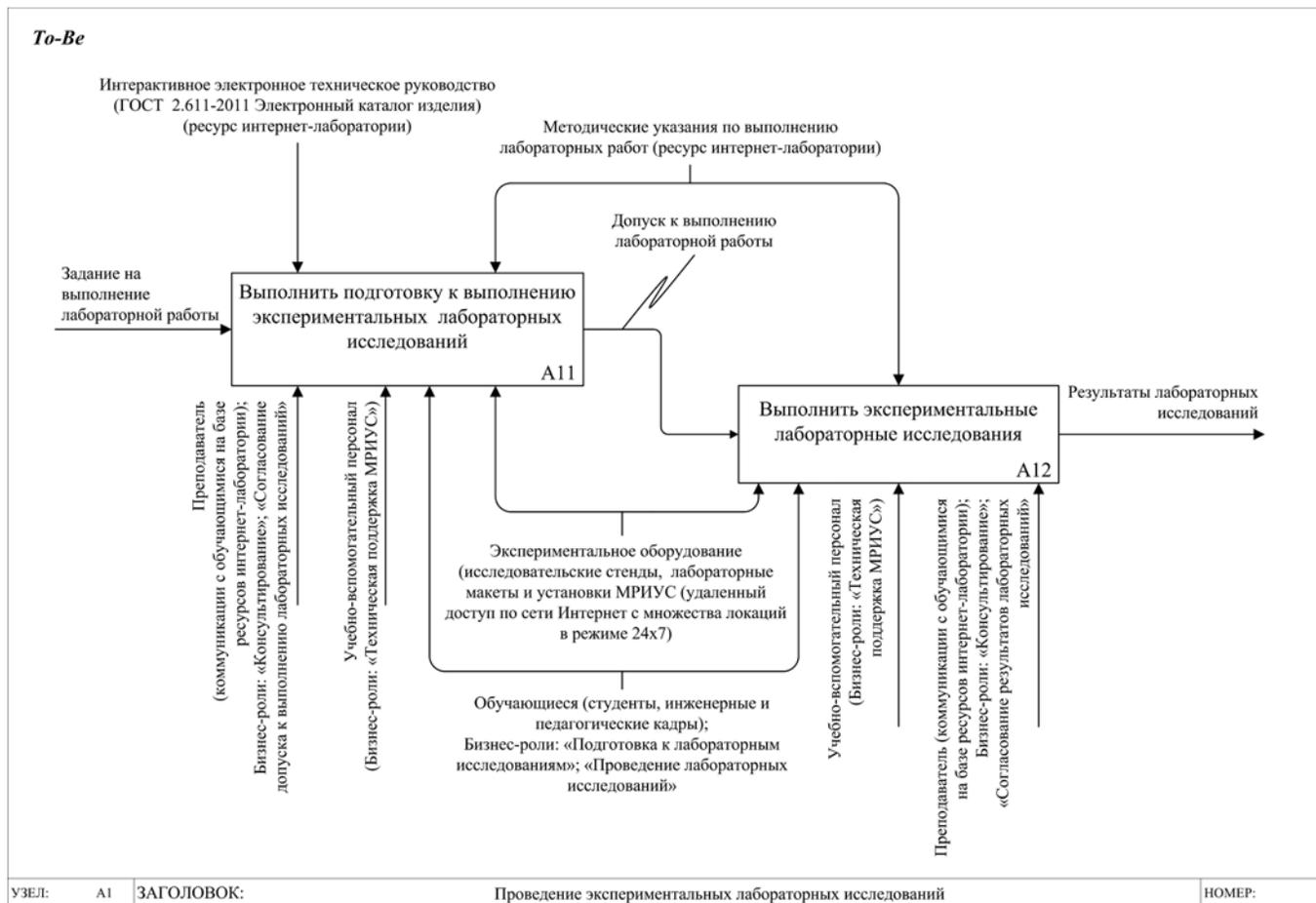


Рис. 8. Фрагмент $IDEF_0$ -диаграммы трансформированного БП проведения лабораторных исследований в отраслевой системе подготовки кадров

в любом месте" применительно к экспериментальным лабораторным исследованиям позволяет перейти к формированию и анализу полноценного цифрового следа каждого обучающегося с применением методов электронной педагогики.

На рис. 9 приведена сравнительная лепестковая диаграмма, отражающая основные изменения параметров модифицированного процесса по сравнению с исходным. Рассмотрим дополнительные эффекты, получаемые за счет трансформации исходного ($As-Is$) БП.

Опыт разработки и эксплуатации МРИУС показывает, что по сравнению с традиционной моделью проведения лабораторных исследований, которая позволяет за 2 смены работы в день при 15 рабочих местах обеспечить выполнение лабораторных исследований 100 обучающимся, применение МРИУС позволяет обеспечить выполнение лабораторных исследований до 400 обучающимися [18]. В первом случае задействуется 15 лабораторных установок, и достигается пропускная способность лабора-

тории 100 обучающихся в сутки, а во втором случае задействуется один образец МРИУС, который обеспечивает пропускную способность до 400 обучающихся в сутки. В случае



Рис. 9. Сравнительная лепестковая диаграмма, отражающая основные изменения параметров модифицированного процесса по сравнению с исходным:

1 — исходный БП; 2 — модифицированный БП

необходимости масштабирование МРИУС на требуемое число обучающихся (пользователей) может быть выполнено посредством настройки и/или модификации ее программного и/или аппаратного обеспечения [13].

Изменение пропускной способности оборудования при одновременном снижении его количества приводит также к модификации процессов обслуживания экспериментального оборудования и технической поддержки инфраструктуры специализированной лаборатории, а именно:

1. Каждый лабораторный макет/исследовательский стенд (в области приборостроения и радиоэлектроники) конструктивно выполняется в виде крейта "Евромеханика" 6U или его части. Соответствующая аппаратная часть МРИУС в целом интегрируется в телекоммуникационный шкаф стандарта "Евромеханика" 42U [12]. Доступ к такому оборудованию осуществляется удаленно по сети Интернет с ПЭВМ. Таким образом, экспериментальное оборудование всей специализированной лаборатории может быть представлено телекоммуникационными шкафами, число которых может быть от 1 до 3, которые размещаются и обслуживаются в специализированных помещениях, предназначенных для серверного оборудования.

2. Обслуживание такого экспериментального оборудования требует в 2...3 раза меньше учебно-вспомогательного персонала. Также снижаются объемы финансовых затрат на ремонт помещения и эксплуатируемого экспериментального оборудования, исключается необходимость в обеспечении мероприятий по охране труда обучаемых в специализированных лабораториях.

В качестве системных изменений в БП проведения лабораторных исследований следует выделить возможность полноценной организации подготовки и переподготовки кадров на базе цифровой образовательной среды, которая приобретает свойства высокотехнологичной за счет доступа по сети Интернет к современному экспериментальному оборудованию, обладающему высокой пропускной способностью. В составе таких сред могут быть организованы тематические или профильные интернет-лаборатории, на базе ресурсов которых выполняются все этапы лабораторных исследований [12] — от подготовки к выполнению исследований на базе высокотехнологичного экспериментального оборудования МРИУС и современной технической документации (мультимедийных интерактивных электронных технических ру-

ководств) до непосредственно процесса экспериментальных исследований на базе информационно-коммуникационных технологий [3]. Это, в свою очередь, является важным аспектом в контексте будущей профессиональной деятельности обучающихся [13].

Заключение

Проведенный качественный анализ эффектов трансформации ряда сквозных БП из различных предметных областей, реализуемых с применением разработанных авторами статьи МРИУС, показал значительное улучшение основных показателей модифицированных БП по отношению к исходным. С точки зрения общепринятых показателей анализа эффективности [21] трансформация рассмотренных в статье сквозных БП или их фрагментов позволяет:

- повысить качество БП за счет повышения информативности выполняемых отдельных бизнес-функций и повышения эффективности использования высокотехнологичного экспериментального оборудования;
- сократить число разрывов в БП за счет уменьшения числа бизнес-ролей, задействованных в их реализации;
- сократить длительность выполнения БП за счет существенного сокращения материальных и временных затрат и повышения производительности работ при выполнении отдельных бизнес-функций;
- перейти к сервисной модели доступа к высокотехнологичному экспериментальному оборудованию *Laboratory As A Service* (модель выполнения экспериментальных лабораторных исследований на базе цифровых образовательных сред) [4—9].

Таким образом, разработка и внедрение сквозных цифровых технологий в области радиоэлектронного приборостроения обеспечивает повышение производительности труда, качества и конкурентоспособности создаваемой продукции, стимулирует процессы формирования нового сегмента рынка продуктов и услуг, повышает их доступность. В свою очередь, прикладное применение таких технологий в различных отраслях народного хозяйства РФ требует достижения определенного уровня зрелости исходных БП в организациях и на предприятиях. Как минимум, должны быть сформированы модели основных и вспомогательных БП, определены метрики для их оценки и рассчитаны их значения [22, 23]. Дальнейший

процесс трансформации БП по аналогии с рассмотренными в данной статье позволяет перейти к более высокому уровню зрелости БП — к созданию системы автоматизации и контроля сквозных БП, к созданию модели бизнеса, новых бизнесов и т. д., что соответствует общемировым трендам цифровизации.

Список литературы

1. **Государственная** программа Российской Федерации "Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности" (утверждена постановлением Правительства РФ от 15 апреля 2014 г № 328).
2. **Программа** "Цифровая экономика Российской Федерации" (утверждена распоряжением Правительства РФ от 28 июня 2017 г. № 1632-р).
3. **ГОСТ Р 57721—2017.** Информационно-коммуникационные технологии в образовании. Эксперимент виртуальный. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2017.
4. **Tawfik M., Salzmann C., Gillet D., Lowe D., Saliyah-Hassane H., Sancristobal E., Castro M.** Laboratory as a Service (LaaS): a novel paradigm for developing and implementing modular remote laboratories // *iJOE*. 2014. Vol. 10, N. 4. P. 13—21. doi:10.3991/ijoe.v10i4.3654.
5. **Sannnie J., Oruklu E.** Transforming computer engineering laboratory courses for distance learning and collaboration // *International Journal of Engineering Education*. 2015. Vol. 31, N. 1(A). P. 106—120.
6. **Мазурицкий М. И., Солдатов А. В.** Интерактивные сетевые научно-образовательные ресурсы для естественно-научного образования // *Высшее образование в России*. 2014. № 1. С. 80—87.
7. **Bilyatdinova A., Karsakov A., Bezgodov A. A., Dukhanov A. V.** Virtual environment for creative and collaborative learning // *Knowledge, Information and Creativity Support Systems*. Switzerland: Springer International Publishing, 2016. P. 371—381.
8. **Hussin A.** Education 4.0 made simple: ideas for teaching // *International Journal of Education & Literacy Studies*. 2018. Vol. 6(3). P. 92—98. doi: 10.7575/aiac.ijels.v.6n.3p.92.
9. **Grodotzki J., Ortelt T., Tekkaya A.** Remote and virtual labs for engineering Education 4.0 // *Procedia Manufacturing*. 2018. Vol. 26. P. 134—1360. doi:10.1016/j.promfg.2018.07.126.
10. **ISO/IEC 30141:2018.** Internet of Things (IoT) — Reference Architecture, 2018.
11. **ГОСТ ISO/IEC 17788-2016.** Информационные технологии (ИТ). Облачные вычисления. Общие положения и терминология. М.: Стандартинформ, 2016.
12. **Сарафанов А. В., Комаров В. А., Суковатый А. Г., Худоногов Д. Ю.** Изучение физических эффектов с использованием дистанционных технологий // *Информатизация образования и науки*. 2012. № 4(16). С. 49—63.
13. **Комаров В. А., Сарафанов А. В., Тумковский С. Р.** Многопользовательские распределенные измерительно-управляющие системы как элемент современной цифровой образовательной среды // *Информационно-управляющие системы*. 2019. № 2. С. 83—94. doi:10.31799/1684-8853-2019-2-83-94.
14. **Комаров В. А., Пичкалев А. В.** Применение технологий NI FPGA при испытаниях бортовой аппаратуры космических аппаратов // *Интеллект и наука: труды XI Междунар. научн.-практ. конф., Железногорск, 28—29 апреля 2011 г.* Красноярск: Центр информатизации, 2011. С. 146—148.
15. **Комаров В. А., Семкин П. В.** Разработка архитектуры эмулятора интерфейсных модулей сопряжения систем жизнеобеспечения космических аппаратов // *Сибирский журнал науки и технологий*. 2019. Т. 20, № 2. С. 228—235. doi: 10.31772/2587-6066-2019-2-228-235.
16. **Komarov V. A., Pazderin S. O., Sarafanov A. V.** Method for qualification testing of satellite-communication earth stations // *Measurement Techniques*. 2016. Vol. 59, N. 1. P. 8—11. doi: 10.1007/s11018-016-0907-3.
17. **Komarov V. A., Pazderin S. O.** Analysis of the effectiveness of the method of qualification tests for satellite communications earth stations // *Measurement Techniques*. 2019. Vol. 62, N. 4. P. 307—311. doi: 10.1007/s11018-019-01622-0.
18. **Исследования** физических явлений в электрических цепях с применением Интернет-технологий: учебное пособие / М. Л. Дектерев, В. А. Комаров, А. Г. Суковатый и др.; Под ред. А. В. Сарафанова. М.: ДМК Пресс, 2015. 432 с. (<https://dmkpress.com/catalog/electronics/labview/978-5-97060-153-2/>).
19. **ГОСТ Р 52003-2—2003.** Уровни разукрупнения РЭС. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2003.
20. **Пичкалев А. В.** Наземный отладочный комплекс бортовой радиоэлектронной аппаратуры // *Решетневские чтения: материалы XIV Междунар. науч. конф.; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2010.* С. 515—516.
21. **Дубинина Н. А.** Показатели оценки бизнес-процессов предприятия // *Вестник Пермского университета. Сер. "Экономика"*. 2016. № 2(29). С. 179—191. doi: 10.17072/1994-9960-2016-2-179-191.
22. **Sheer A. W.** ARIS — Business Process Modeling. Berlin: Springer Verlag, 2000. 218 p.
23. **Silver B.** BPMN methods and style / B. Silver. 2nd ed. Aptos: Cody-Cassidy Press, 2011. 286 p.

V. A. Komarov, PhD, Tech., Associate Professor, e-mail: VKomarov@iss-reshetnev.ru, SC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite System", Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation,
A. V. Sarafanov, Dr. Sc. Tech., Professor, e-mail: Sarafanov@i-teco.ru, ООО "Vitte Consulting" (GK "I-Teco"), Moscow, 117036, Russian Federation,
S. R. Tumkovskiy, Dr. Sc. Tech., Professor, e-mail: STumkovskiy@hse.ru, National Research University "Higher School of Economics", Moscow, 101000, Russian Federation

The Experience of Digital Transformation of Business Processes of Applied Experimental Research by Using the Multitenancy of the Resources

As part of the digital transformation of various areas of human activity, the urgent task is to transform existing business processes (BP) in order to increase their variability according to the needs of the customer, to increase productivity, quality

and competitiveness of products. The introduction of end-to-end digital technologies allows for this. The article examines the experience of transforming the BP of experimental research in solving a number of applied tasks in the field of electronic instrumentation, which is obtained as a result of the introduction of operation technology for test, research and laboratory equipment based on the concept of multitancy. Developed on the basis of the experience of the authors, a number of industrial samples and prototype multiuser distributed measurement-control systems implementing this concept have allowed to transform the following processes: end-to-end BP of tests on-board electronic equipment of spacecraft (communications, relay, navigation, geodesy, remote sensing, etc.); BP of forming the operational load of the spacecraft's on-board relay complex; BP of conducting experimental laboratory research in the industry training system. The effectiveness of modernized BP was evaluated on the basis of their formalized models and a set of qualitative indicators. The key resulting effects of transformation: improving the quality of BP by improving the informativeness of individual business functions and the efficiency of the use of high-tech experimental equipment; reducing the number of gaps in BP by reducing the number of business roles involved in their implementation; reducing the duration of BP by significantly reducing material and time costs and improving the productivity of individual business functions; transition to a service model "Laboratory As Service" for access to high-tech equipment while performing experimental laboratory studies based on digital educational environments.

Keywords: Digital transformation, end-to-end digital technologies, business process, experimental research, test operations, efficiency, laboratory equipment, distributed measuring-control system, multitancy, e-learning, laboratory as a service

DOI: 10.17587/it.27.41-50

References

1. **Government** program of Russian Federation "Industry development and increasing its competitiveness" (approved by the Government of the Russian Federation in its resolution No 328 dated April 15, 2014) (in Russian).
2. **The program** "Digital Economy of the Russian Federation" (approved by the Government of the Russian Federation in its resolution No. 1632-r dated July 28, 2017) (in Russian).
3. **State Standard R 57721-2017.** Information and communication technologies in education. The experiment is virtual. General provisions, Moscow, Standartinform, 2017 (in Russian).
4. **Tawfik M., Salzmann C., Gillet D., Lowe D., Saliah-Hassane H., Sancristobal E., Castro M.** Laboratory as a Service (Laas): a novel paradigm for developing and implementing modular remote laboratories, *iJOE*, 2014, vol. 10, no. 4, pp. 13–21. doi:10.3991/ijoe.v10i4.3654.
5. **Sannie J., Oruklu E.** Transforming computer engineering laboratory courses for distance learning and collaboration, *International Journal of Engineering Education*, 2015, vol. 31, no. 1(A), pp. 106–120.
6. **Mazuritsky M. I., Soldatov A. V.** Interactive network resources for natural science education and research, *Vysshee Obrazovanie v Rossii*, 2014, no. 1, pp. 80–87 (in Russian).
7. **Bilyatdinova A., Karsakov A., Bezgodov A. A., Dukhanov A. V.** Virtual environment for creative and collaborative learning, *Knowledge, Information and Creativity Support Systems*, Springer International Publishing, 2016, pp. 371–381.
8. **Hussin A.** Education 4.0 made simple: ideas for teaching, *International Journal of Education & Literacy Studies*, 2018, vol. 6(3), pp. 92–98, doi: 10.7575/aiac.ijels.v6n.3p.92.
9. **Grodotzki J., Ortel T., Tekkaya A.** Remote and virtual labs for engineering Education 4.0, *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 26, pp. 1349–1360, doi:10.1016/j.promfg.2018.07.126.
10. **ISO/IEC 30141:2018.** Internet of Things (IoT) — Reference Architecture, 2018.
11. **State Standard ISO/IEC 17788-2016.** Information Technology (IT). Cloud computing. General provisions and terminology, Moscow, Standartinform, 2016 (in Russian).
12. **Sarafanov A. V., Komarov V. A., Sukovaty A. G., Khudonogov D. U.** Investigation of physical effects using remote technologies, *Informatizatsiya Obrazovaniya i Nauki*, 2012, no. 4(16), pp. 49–63 (in Russian).
13. **Komarov V. A., Sarafanov A. V., Tumkovskiy S. R.** Multi-user distributed information-control systems as an element of modern digital educational environment, *Informatsionno-Upravliayushchie Sistemy*, 2019, no. 2, pp. 83–94 (in Russian), doi:10.31799/1684-8853-2019-2-83-94.
14. **Komarov V. A., Pichkalev A. V.** Application of NI FPGA technologies in testing spacecraft onboard equipment, *Intellect i nauka: trudy XI Mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. ZHeleznogorsk, 28–29 aprelya 2011 g.*, Krasnoyarsk, 2011, pp. 146–148 (in Russian).
15. **Komarov V. A., Semkin P. V.** Development of interface module emulator architecture for spacecraft life support systems, *Siberian Journal of Science and Technology*, 2019, vol. 20, no. 2, pp. 228–235, doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-2-228-235.
16. **Komarov V. A., Pazderin S. O., Sarafanov A. V.** Method for qualification testing of satellite-communication earth stations, *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59, no. 1, pp. 8–11, doi: 10.1007/s11018-016-0907-3.
17. **Komarov V. A., Pazderin S. O.** Analysis of the effectiveness of the method of qualification tests for satellite communications earth stations, *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 4, pp. 307–311, doi: 10.1007/s11018-019-01622-0.
18. **Volodina D. N., Dekterev M. L., Komarov V. A., Presnyakova G. O., Sarafanov A. V., Sukovaty A. G., Trukhin A. A., Khudonogov D. U.** Research of physical effects in electrical circuits using Internet technologies, Moscow, DMK-Press, 2015, 432 p. (in Russian), available at: <https://dmkpress.com/catalog/electronics/labview/978-5-97060-153-2/>.
19. **State Standard R 52003-2 — 2003.** Disaggregation levels of downsizing of electronic equipment. Terms and definitions, Moscow, Standartinform, 2003 (in Russian).
20. **Pichkalev A. V.** The terrestrial debugging complex for on-board radio-electronic equipment, *Reshetnevskiy chteniya: materialy XIV Mezhdunar. nauch. konf.*, Krasnoyarsk, 2010, pp. 515–516 (in Russian).
21. **Dubinina N. A.** Assessment indices for business processes at an enterprise, *Vestnik Permskogo universiteta. Ser. "Ekonomika"*, 2016, no. 2(29), pp. 179–191, doi: 10.17072/1994-9960-2016-2-179-191 (in Russian).
22. **Sheer A. W.** ARIS — Business Process Modeling, Berlin, Springer Verlag, 2000, 218 p.
23. **Silver B.** BPMN methods and style, Aptos, Cody-Cassidy Press, 2011, 286 p.

Е. Б. Доронина, инженер-конструктор¹, аспирант²,
¹ СКБ "Меридиан", ГППП "Гранит",
² НОЦ ВКО "Алмаз-Антей",
А. В. Скатков, д-р техн. наук, проф.,
Севастопольский государственный университет

Задача анализа эффективности ремонтно-профилактических работ сложной технической аппаратуры

Рассмотрены особенности задачи исследования эффективности ремонтно-профилактических работ сложной технической аппаратуры, представлен ряд постановок задач, отражающих проблемы выбора оптимального плана обслуживания в рамках определенной последовательности операций. Рассмотрены скалярное и векторное представления задачи, предложена схема реализации подхода к поддержке принятия решений по повышению эффективности планов ремонтно-профилактических работ.

Ключевые слова: сложная техническая аппаратура, жизненный цикл, организационное управление, техническое обслуживание и ремонт, ремонтно-профилактические работы, планирование обслуживания

Введение

Во многих областях эксплуатации современной техники применяется особый класс технических систем — сложная техническая аппаратура (СТА). К особенностям СТА можно отнести сложность функционального и структурного типов, а также компонентную гетерогенность и разнородность решаемых задач с учетом неопределенности в условиях их решения [1–3]. Обобщенная структура СТА подразумевает наличие программного управления, электронной составляющей, мехатронных элементов, участие в работе человека-оператора, что в сумме определяет указанные выше сложности.

Важнейшими характеристиками таких систем является потенциальная надежность, готовность, наработка на отказ и длительность жизненного цикла в целом. Жизненный цикл СТА связан с рядом проблем, в том числе с неопределенностью параметров некоторых этапов (например, последовательности этапов испытаний СТА в случае параметрического доведения характеристик до требуемых значений), стохастичностью процессов, составляющих этапы (например, этапы ремонта могут быть различной длительности для разных образцов СТА), разнотипностью задач при обслуживании СТА.

В работах [1, 2] введено понятие технического обслуживания и ремонта (ТОиР), представляющего собой комплекс технологических операций и организационных действий по поддержанию работоспособности или исправности объекта при его использовании по назначению, ожи-

дании, хранении и транспортировании. ТОиР могут быть как плановыми (регламентированными), так и неплановыми. Наряду с ТОиР, применяются термины: (А) ремонтно-профилактические работы (РПР) — это комплекс мероприятий, направленных на предупреждение износа и содержания в работоспособном состоянии оборудования; (Б) контрольно-проверочные работы, которые проводятся в целях установления соответствия между техническим состоянием оборудования и заранее заданными допусками на возможные отклонения параметров изделий, изложенных в эксплуатационной документации, и другие. В нормативной документации к типам СТА применяется различная трактовка и уточнение определений (А) и (Б).

С учетом формулировки РПР СТА определим технологический процесс обслуживания СТА [3]. Основной целью обслуживания является доведение параметров СТА до значений, заданных в нормативно-технических документах на основе достоверного определения и всесторонней оценки параметров обслуживаемой СТА. Техническое обслуживание и ремонт СТА осуществляются при возможной неопределенности параметров процесса, поскольку задачи РПР в некоторых случаях не являются директивно определенными, а возникают динамически. Проблематика задач РПР обусловлена: сложностью и многокомпонентностью СТА, необходимостью многовариантного тестирования каждого элемента СТА, целесообразностью оценки полноты, частоты, длительности, интенсивности, избыточности при формировании планов

РПР; наличием априорной неопределенности в состоянии элементов СТА и, как следствие, неопределенности в процессе управления РПР [4–6]. В связи с этим методы оценки состояния аппаратуры и анализ эффективности работ по техническому обслуживанию требуют научной проработки, вследствие чего является актуальным моделирование процессов РПР СТА.

Цель исследования: построение модели выбора вариантов технического обслуживания и ремонта СТА при минимизации затрат (ресурсов) в процессе РПР (в рамках ТОиР) с учетом ограничений на сроки выполнения работ и требуемую результативность.

Для решения поставленной задачи необходимо рассмотреть схему процесса РПР СТА (рис. 1).

Приведенная на рис. 1 обобщенная схема основных процессов и задач РПР содержит следующие подсистемы:

- идентификации элемента СТА (ИЭ СТА) (в которой определяется класс элемента, подлежащего тестированию);
- идентификации задачи (ИЗ СТА) (в этой подсистеме определяется класс задачи, например: написание или проверка теста для элемента СТА или формирование базы данных тестов);
- тестирования СТА, оценки качества тестов и формирования отсутствующих тестов в базе данных (ТОТФТ) (в этой подсистеме реализуются процессы тестирования СТА, поиска теста в базе данных (БД) и анализ существующих тестов, а при отсутствии таковых — формирование новых тестов);
- оценки результатов тестирования СТА (ОРТ СТА) (в которой осуществляется оценка выходных решений идентифицированной задачи применительно к идентифицированному элементу).

Процесс идентификации элемента в подсистеме ИЭ СТА реализуется путем соотнесения с базовыми директивно определенными образцами из конечного множества классов элементов. Идентификация задачи в подсистеме

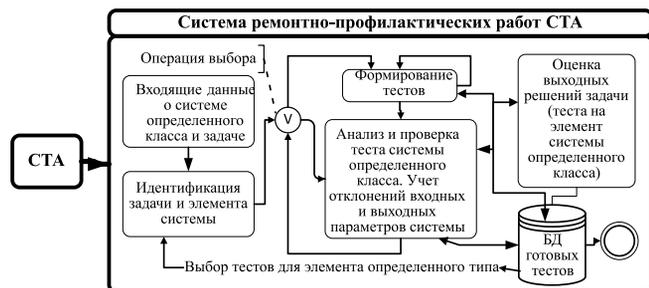


Рис. 1. Структура процесса технического обслуживания и ремонта сложной технической аппаратуры

ИЗ СТА осуществляется путем выбора из множества директивных задач: проверка качества теста (на эталонном элементе), тестирование элемента (проверка, отладка, ремонт, профилактика). Подсистема ТОТФТ представляет собой группу действий: тестирование элемента, поиск и оценка теста, при отсутствии нужного теста в базе — формирование теста и запись его в БД. Подсистема ОРТ СТА реализует процесс оценки качества выходных решений текущей задачи на основе учета отклонений выходных значений элемента СТА по прилагаемой справочной документации.

Таким образом, основным процессом обслуживания элементов СТА является их тестирование. Под планом РПР СТА [7] понимается совокупность действий, направленных на осуществление технического обслуживания, ремонта и профилактики сложной технической аппаратуры, т.е. план РПР — это последовательность операций, необходимых при тестировании сложной технической аппаратуры. В связи с тем, что последовательность операций, их длительность и важность могут быть различными, формируется множество последовательностей операций — множество вариантов планов РПР СТА [8, 9].

С учетом возможной вариативности РПР можно сформировать матрицу x , элементы x_{ij} которой задают факт наличия или отсутствия j -й операции ($j = \overline{1..J}$) в альтернативных планах V_i , $i = \overline{1..I}$:

$$x = \begin{matrix} & f_1 & f_2 & \dots & f_J \\ V_1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1J} \\ V_2 & x_{21} & & \dots & x_{2J} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ V_N & x_{N1} & x_{N2} & \dots & x_{NJ} \end{matrix}, \quad (1)$$

где x_{ij} — переменная, равная единице, если j -я операция осуществляется при i -м варианте плана РПР, и равная нулю в противном случае:

$$\sum_{i=1}^I x_{ij} \leq 1, \quad i = \overline{1, I}, \quad j = \overline{1, J}, \quad x_{ij} \in \{1, 0\}.$$

Анализ эффективности проведения РПР СТА проводится на основе применения различных специальных метрик. В данном исследовании эффективность W_i i -го варианта плана РПР определяется на основе трех показателей:

$$(I_i, O_i, R_i), \quad (2)$$

где i — номер плана РПР, I_i — метрика информативности, которая представляет собой оценку полноты полученной информации

в процессе тестирования по i -му плану; O_i — метрика оперативности, представляет собой оценку времени, затраченного на тестирование, необходима для принятия решений ЛПР по своевременному обеспечению выполнения i -го плана; R_i — метрика (оценка) ресурсов, необходимых для реализации РПР СТА, используется ЛПР для оптимизации требуемого обеспечения процесса РПР по i -му плану.

На основе указанных метрик ЛПР выбирает последовательность действий на каждом шаге, улучшая хотя бы одну из характеристик, если такая возможность существует, т. е. принимается допущение, что каждый новый план улучшает одну из метрик, не ухудшая другие:

$$W_{i+1}(I_{i+1}, O_{i+1}, R_{i+1}) \geq W_i(I_i, O_i, R_i). \quad (3)$$

В случае, если ни одна из характеристик не улучшается, процесс оканчивается. Отметим, что возможны случаи, когда для некоторого плана РПР предполагается, что монотонность не соблюдается по всем метрикам одновременно, но при этом является характеристикой некоторых из них. Тогда будем говорить о частичной (локальной) монотонности оценки эффективности, например, для случаев:

$$W_{i+1}(I, O_{i+1}, R_{i+1}) \geq W_i(I, O_i, R_i), \quad (4)$$

при $I_{i+1} = I_i$;

$$W_{i+1}(I_{i+1}, O, R_{i+1}) \geq W_i(I_i, O, R_i), \quad (5)$$

при $O_{i+1} = O_i$;

$$W_{i+1}(I_{i+1}, O_{i+1}, R) \geq W_i(I_i, O_i, R), \quad (6)$$

при $R_{i+1} = R_i$.

Выражение (4) описывает ситуацию, когда ЛПР задает условия выбора оптимального плана РПР при неизменной информативности, т.е. без изменения энтропийной характеристики плана; выражение (5) определяет ситуацию, когда ЛПР формулирует условия выбора оптимального плана РПР при директивно заданных сроках выполнения плана. Выражение (6) задает условия выбора оптимального плана РПР при неизменном объеме ресурсов РПР СТА.

Для задач, когда ЛПР формулирует условия в рамках частичной монотонности метрики эффективности, при оценке эффективности варианта плана РПР возможно учитывать одновременно несколько фиксированных параметров, например, оперативность и ресурсы:

$$W_{i+1}(I_{i+1}, O, R) \geq W_i(I_i, O, R) \mid O_{i+1} = O_i, R_{i+1} = R_i. \quad (7)$$

Решение задачи анализа эффективности плана РПР

Свойство монотонности оценок эффективности плана РПР позволяет формулировать и сравнивать различные стратегии принятия решений по построению этих планов [10, 11]. Введем следующие обозначения: $H(A)$ — безусловная энтропия процесса на входе РПР; $H(A|Y)$ — условная энтропия процесса A на входе РПР при условии, что на его выходе получен выходной процесс Y .

Тогда, поскольку повышение информативности соответствует снижению неопределенности, то $I_{AY} = H(A) - H(A|Y)$ — неопределенность состояния СТА в результате РПР при входном процессе A и выходном процессе Y .

Под оперативностью будем понимать минимальное время T , необходимое для достижения заданного результата. Оценка ресурсов будет заключаться в анализе стоимости C . Поскольку рассматривается множество вариантов планов, включающих множество операций, величины T , H , C могут быть представлены в форме матриц:

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \dots & t_{1J} \\ t_{21} & t_{22} & \dots & t_{2J} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{N1} & t_{N2} & \dots & t_{NJ} \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1J} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2J} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{N1} & c_{N2} & \dots & c_{NJ} \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1J} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2J} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{N1} & h_{N2} & \dots & h_{NJ} \end{bmatrix}.$$

Целевые функции представляют собой сумму затрат на проведение РПР СТА, сумму времени осуществления РПР СТА и суммарную информативность РПР СТА соответственно с ограничениями на сроки реализации процесса и требуемого уровня результатов РПР (отклонений от заданных характеристик):

$$\sum_{j=1}^J c_{ij} x_{ij} = F_j(x_{ij}) \rightarrow \min, \quad i = \overline{1, I}; \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^J t_{ij} x_{ij} = D_j(x_{ij}) \rightarrow \min, \quad i = \overline{1, I}; \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^J h_{ij} x_{ij} = S_j(x_{ij}) \rightarrow \min, \quad i = \overline{1, I}, \quad (11)$$

где c_{ij} — стоимость выполнения i -го варианта плана РПР, $c_{ij} > 0$; h_{ij} — показатель энтропии, отражающий неопределенность состояния СТА в результате РПР для i -го варианта плана; t_{ij} — время, требуемое на выполнение i -го варианта плана РПР СТА, $t_{ij} > 0$; i — номер варианта, $i = \overline{1, I}$; j — номер операции РПР, $x_{ij} \in \{1, 0\}$.

Выражения (9)–(11) рассматриваются при условиях

$$H_{\min} \leq h_{ij} \leq H_{\max}, t_{ij} \leq T_{\max}, c_{ij} \leq C_{\max}, \quad (12)$$

которые формулируют ограничения на критические значения информативности I_{\min} , оперативности O_{\min} и ресурса R для РПР, выраженные в виде энтропии h_{ij} , времени реализации операций t_{ij} , стоимости C_{\max} , и определяются конкретными задачами и особенностями СТА.

Значение переменной $x_{ij} = 1$ трактуется как наличие процесса тестирования (реализации j -й операции из состава РПР СТА).

Таким образом, ставится задача поиска такого x_{ij} , $i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$, которое удовлетворяет значениям целевых функций (9)–(11) при ограничениях (12). В простейшем случае может быть получена одна матрица, доставляющая минимум по всем условиям, что практически не является возможным вариантом. Поэтому решение поставленной задачи может быть проведено методом уступок с учетом требований ЛПР.

Требования ЛПР могут заключаться в наложении дополнительных ограничений на максимально допустимое число вариантов плана N и максимально допустимое число операций J .

Предложенные постановки задач оптимизации суммарных затрат на проведение РПР СТА, оперативности осуществления РПР СТА или информативности этого процесса

соответственно с ограничениями на сроки реализации процесса и требуемого уровня результатов РПР (отклонений от заданных характеристик) относятся к области задач дискретной оптимизации и решаются известными методами.

Подход к принятию решений на основе многокритериальной оптимизации РПР СТА

В постановке многокритериальной оптимизации РПР СТА (МКО РПР СТА) [12–14] решаются задачи принятия решений одновременно по нескольким критериям: h_{ij} , t_{ij} , c_{ij} , что соответствует ряду практических применений предложенного метода.

При решении задачи возможны ситуации, когда ЛПР задает условия выбора оптимального плана РПР при неизменной информативности, при директивно заданных сроках выполнения плана; в рамках частичной монотонности параметров, при оценке эффективности

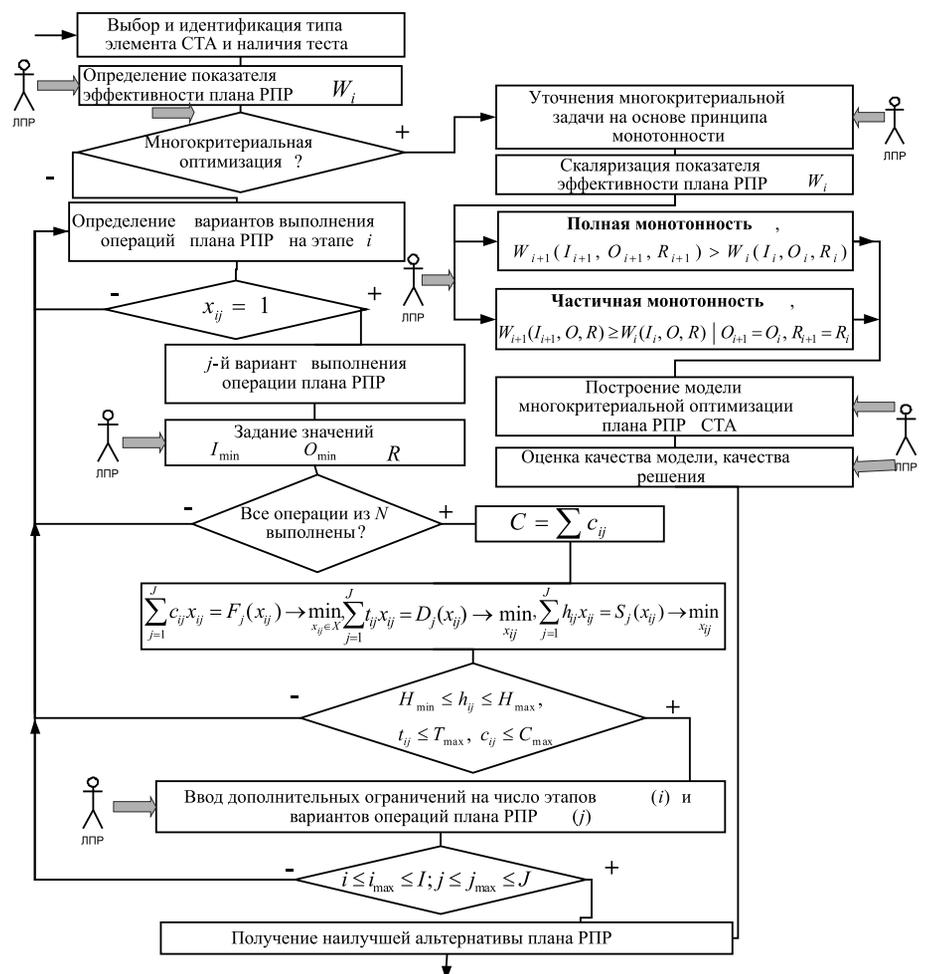


Рис. 2. Схема процесса принятия решений по поиску наилучшей альтернативы РПР СТА

варианта плана РПР или с учетом одновременно неизменных сроков выполнения плана и директивно заданном количестве ресурсов РПР СТА соответственно.

В целях обобщения предложенных постановок задач построена схема, отражающая последовательность действий двухэтапного подхода к выбору наилучшей альтернативы РПР СТА (рис. 2).

Таким образом, подход (рис. 2) подразумевает следующий способ решения поставленной задачи построения модели технического обслуживания и ремонта СТА при минимизации затрат (ресурсов) в процессе РПР с учетом ограничений на сроки выполнения работ и требуемую результативность: первый путь основан на учете свойства монотонности оценок эффективности плана РПР, позволяющего формулировать и сравнивать различные стратегии принятия решений по построению этих планов; второй подход к принятию решений основан на многокритериальной оптимизации РПР СТА (МКО РПР СТА), в постановке (МКО РПР СТА) решаются задачи принятия решений одновременно по нескольким критериям h_{ij} , t_{ij} , c_{ij} .

Заключение

Основными сложностями задач РПР является многокомпонентность СТА, необходимость многовариантной проверки каждого элемента СТА, наличие неопределенности в состоянии элементов СТА и, как следствие, неопределенности в процессе управления РПР. При этом требования к эффективности РПР часто меняются в процессе постановки плана РПР. Поэтому получение решений, минимизирующих требования к скорости, полноте, стоимости РПР, не является тривиальной задачей динамического программирования. Получение матриц, сформированных на основе альтернативных планов и различных требований к ним, не может быть получено без активного участия ЛПР, что, в свою очередь, приводит к увеличению скорости принятия решений по выбору оптимальной альтернативы (варианта) плана РПР.

В работе поставлены задачи в пространстве требований и построена схема процесса принятия решений по выбору наилучшей альтернативы РПР СТА.

Предложенные модели и схемы решений позволили управлять эффективностью РПР при заданных ограничениях и подготовили возможность принимать решения в рамках ор-

ганизационного управления процессом РПР СТА. Дальнейшие направления исследований авторы планируют в области моделирования процесса принятия решений на основе предложенных схем.

Список литературы

1. ГОСТ 18322—2016 Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения (дата обращения: 02.11.2020).
2. ГОСТ 27.002—89 "Надежность в технике Основные понятия. Термины и определения" (дата обращения: 15.03.2020).
3. Алексеев В. В., Хоменко И. В., Прохорский Р. А. Модели планирования ремонтов и замен элементов в процессе жизненного цикла сложных технических систем // Вестник ВИ МВД России. 2011. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modeli-planirovaniya-remontov-i-zamen-elementov-v-protsesse-zhiznennogo-tsikla-slozhnyh-tehnicheskikh-sistem> (дата обращения: 20.04.2020).
4. Аверченков В. И., Ерохин В. В. Системы организационного управления: Учеб. пособ. М.: Флинта, 2011. 208 с.
5. Бурков В. Н., Коргин Н. А., Новиков Д. А. Введение в теорию управления организационными системами. М.: Либро-ком, 2009. 264 с.
6. Никифоров В. О., Слита О. В., Ушаков А. В. Интеллектуальное управление в условиях неопределенности: Учеб. пособ. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. 226 с.
7. Дударенко Н. А., Нуйя О. С., Сержантова М. В., Ушаков А. В. Оценивание процесса вырождения многоканальных функциональных систем с человеком-оператором в их составе // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 1. С. 5—11.
8. Golub G. H., Van Loan C. F. Matrix Computations. Johns Hopkins University Press, 2012. 790 p.
9. Safari A., Eslamloueyan R. Controlled variables selection based on lost work minimisation // International Journal of Exergy. 2018. Vol. 27, N. 3. P. 334—363.
10. Di Barba P. Basic principles of optimal design of electromagnetic devices and multi-objective optimization // ASM Handbook, Induction Heating and Heat Treatment. 2014. Vol. 4C. P. 359—365.
11. Арепин Ю. И., Смоляков А. А., Допира Р. В. Военная кибернетика: методология создания автоматизированных систем управления техническим обеспечением. Тверь: ЗАО НИИ "Центрпрограммсистем", 2006. 204 с.
12. Новикова Н. М., Поспелова И. И., Зенюков А. И. Метод сверток в многокритериальных задачах с неопределенностью // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2017. № 5. С. 27—45.
13. Арепин Ю. И., Смоляков А. А., Допира Р. В., Щербинко А. В. Построение АСУ инженерно-радиоэлектронным обеспечением ВМФ // Ремонт, восстановление, модернизация. Москва. 2006. № 4. С. 27—32.
14. Юсупов Р. М., Соколов Б. В. и др. Методологические и методические основы теории оценивания качества моделей и полимодельных комплексов // Информация и космос. 2018. № 3. С. 36—43.

E. B. Doronina, Design Engineer of SCB "Meridian",
GPTP "Granit", Postgraduate Student of NOC VKO "Almaz-Antey",
A. V. Skatkov, Ph. D., Professor,
Sevastopol State University

The Task of Analyzing the Effectiveness of Repair and Maintenance Work of Complex Technical Equipment

The article presents the problem of analyzing the efficiency of maintenance and repair of complex technical equipment, shows a number of problem statements that reflect the problems of choosing the optimal service plan within the sequence of operations. The scalar and vector representations of the problem are considered, and a scheme for implementing an approach to evaluating the effectiveness of repair and maintenance plans is proposed.

Keywords: complex technical equipment, life cycle, organizational management, maintenance and repair, repair and maintenance work, maintenance planning

DOI: 10.17587/it.27.51-56

References

1. **GOST 18322—2016** System of technical maintenance and repair of equipment. Terms and definitions (Accessed: 02.11.2020) (in Russian).
2. **GOST 27.002—89** "Reliability in engineering Basic concepts. Terms and definitions" (Accessed: 02.11.2020) (in Russian).
3. **Alekseev V. V., Khomenko I. V., Prokhorsky R. A.** Models for planning repairs and replacements of elements in the life cycle of complex technical systems, *VI Bulletin of the Ministry of internal Affairs of Russia*, 2011, no. 3, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/modeli-planirovaniya-remontov-i-zamen-elementov-v-protsesse-zhiznennogo-tsikla-slozhnyh-tehnicheskikh-sistem> (accessed: 20.04.2020) (in Russian).
4. **Averchenkov V. I., Erokhin V. V.** Systems of organizational management: textbook. Manual, Moscow, Flint, 2011, 208 p. (in Russian).
5. **Burkov V. N., Korgin H. A., Novikov D. A.** Introduction to the theory of management of organizational systems, Moscow, Libro-com, 2009, 264 p. (in Russian).
6. **Nikiforov V. O., Slita O. V., Ushakov A. V.** Intellectual management in conditions of uncertainty: textbook, Saint Petersburg, ITMO state University, 2011, 226 p. (in Russian).
7. **Dudarenko N. A., Nuya O. S., Serzhantova M. V., Ushakov A. V.** Evaluation of the process of degeneration of multi-channel functional systems with a human operator in their composition, *News of higher educational institutions. Instrument making*, 2018, vol. 61, no. 1, pp. 5—11 (in Russian).
8. **Golub G. H., Van Loan C. F.** Matrix Computations, Johns Hopkins University Press, 2012, 790 p.
9. **Safari A., Eslamloueyan R.** Controlled variables selection based on lost work minimization, *International Journal of Exergy*, 2018, vol. 27, no. 3, pp. 334—363.
10. **Di Barba P.** Basic principles of optimal design of electromagnetic devices and multi-objective optimization, *ASM Handbook, Induction Heating and Heat Treatment*, 2014, vol. 4C, pp. 359—365.
11. **Arepin Yu. I., Smolyakov A. A., Dopira R. V.** Military Cybernetics: methodology for creating automated control systems for technical support, Tver, ZAO research Institute "Tsentsprogamsistem", 2006, 204 p. (in Russian).
12. **Novikova N. M., Pospelova I. I., Zenyukov A. I.** Method of convolutions in multi-criteria problems with uncertainty, *Izv. RAS. Theory and Control Systems*. 2017, no. 5, pp. 27—45 (in Russian).
13. **Arepin Yu. I., Smolyakov A. A., Dopira R. V., Scherbinko A. V.** Construction of automated control systems with engineering and radioelectronic support of the Navy, *Repair, restoration, modernization*, 2006, no. 4, pp. 27—32 (in Russian).
14. **Yusupov R. M., Sokolov B. V. et al.** Methodological and methodological foundations of the theory of evaluating the quality of models and polymodel complexes, *Information and Space*, 2018, no. 3, pp. 36—43 (in Russian).

Адрес редакции:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала (499) 269-5510

E-mail: it@novtex.ru

Технический редактор *Е. В. Конова*.

Корректор *М. Ю. Безменова*.

Сдано в набор 09.11.2020. Подписано в печать 28.12.2020. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ ИТ121. Цена договорная.

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

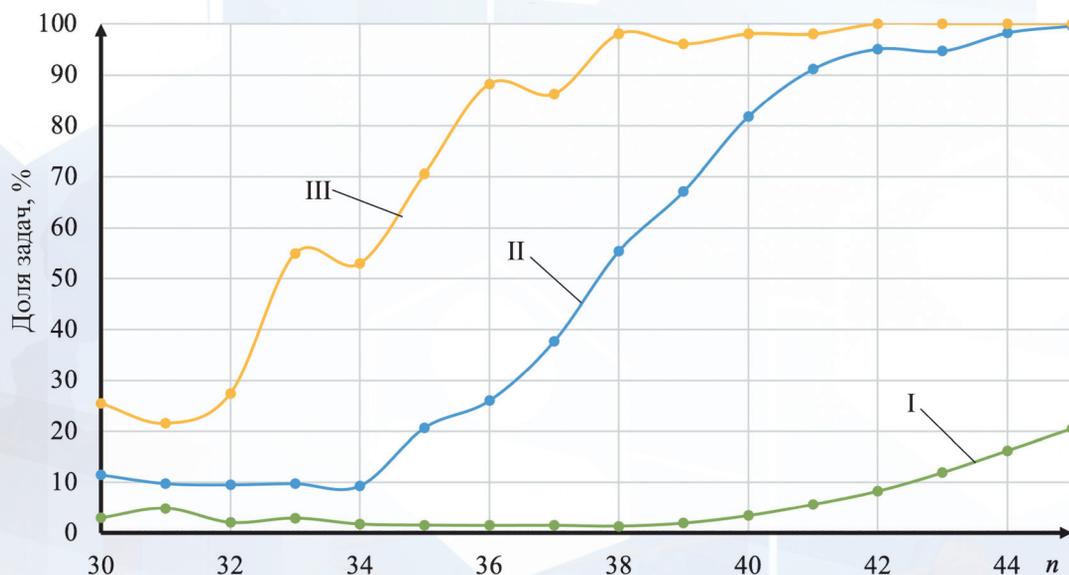
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-15565 от 02 июня 2003 г.

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".

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

Рисунок к статье М. В. Ульянова, М. И. Фомичёва

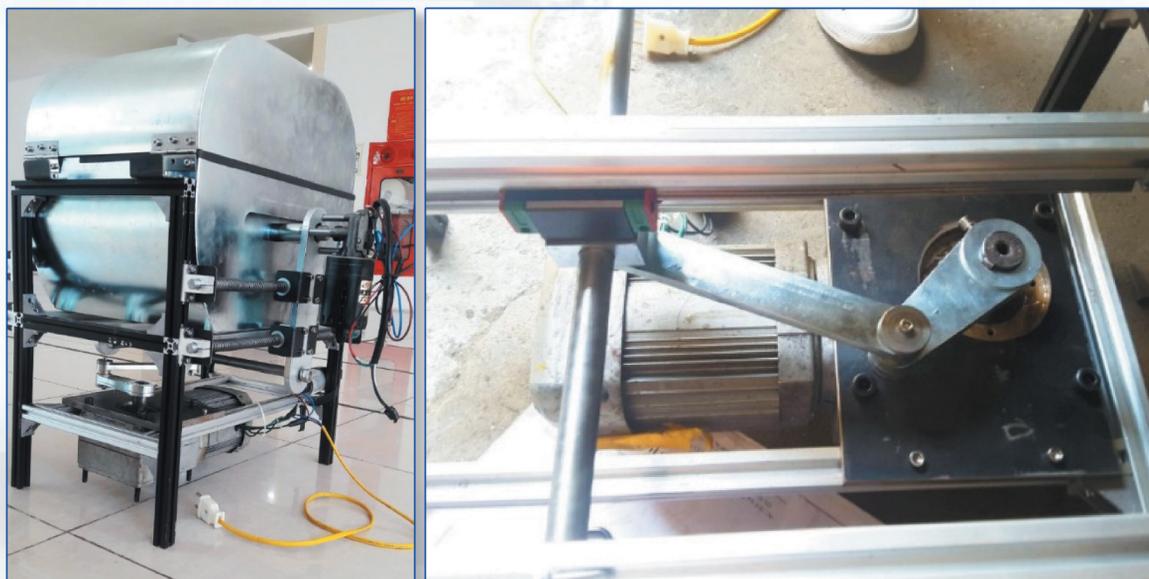
«ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ АСИММЕТРИЧНОЙ ЗАДАЧИ КОММИВОЯЖЕРА»



Доля задач, для которых алгоритм ARS_{LKH} эффективней в разрезе соответствующей категории

Рисунок к статье В. Ф. Буя, С. С. Гаврюшина, В. Б. Фунга,
Х. М. Данга, В. С. Прокопова

«АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГЛАВНОГО ПРИВОДА МОЕЧНОЙ МАШИНЫ НОВОГО ТИПА ДЛЯ ОВОЩЕЙ И ФРУКТОВ»



а)

б)

Рис. 2. Моечная машина для овощей и фруктов (а) и главный привод (б)

Рисунки к статье В. Ф. Буя, С. С. Гаврюшина, В. Б. Фунга,
Х. М. Данга, В. С. Прокопова

«АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГЛАВНОГО ПРИВОДА МОЕЧНОЙ МАШИНЫ НОВОГО ТИПА ДЛЯ ОВОЩЕЙ И ФРУКТОВ»

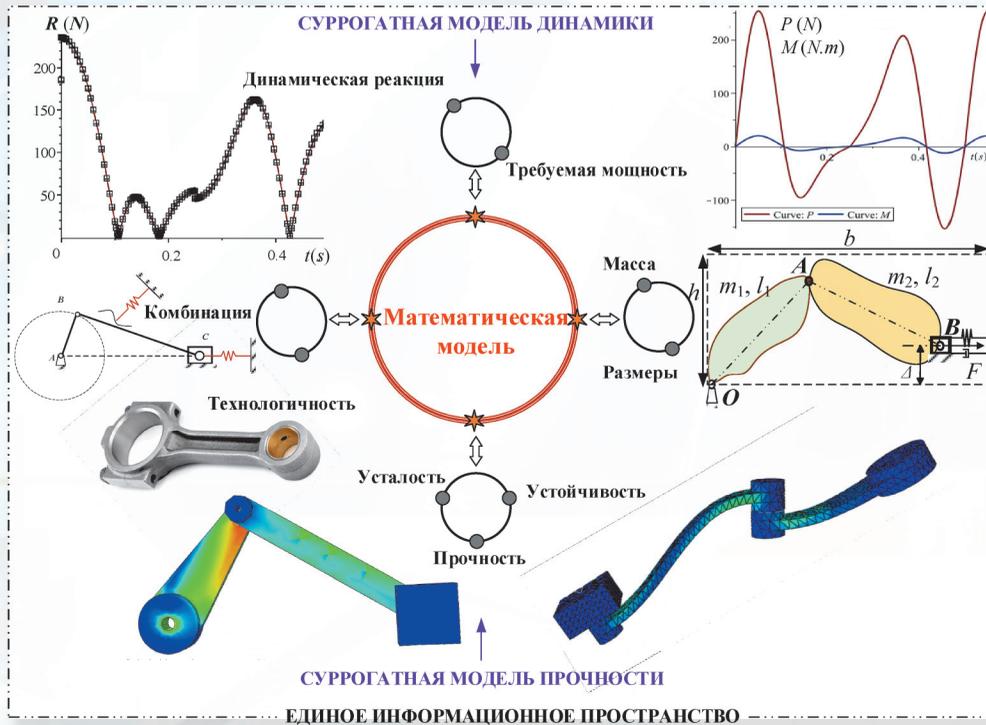


Рис. 4. Проблемы, связанные с многокритериальным проектированием главного привода моечной машины

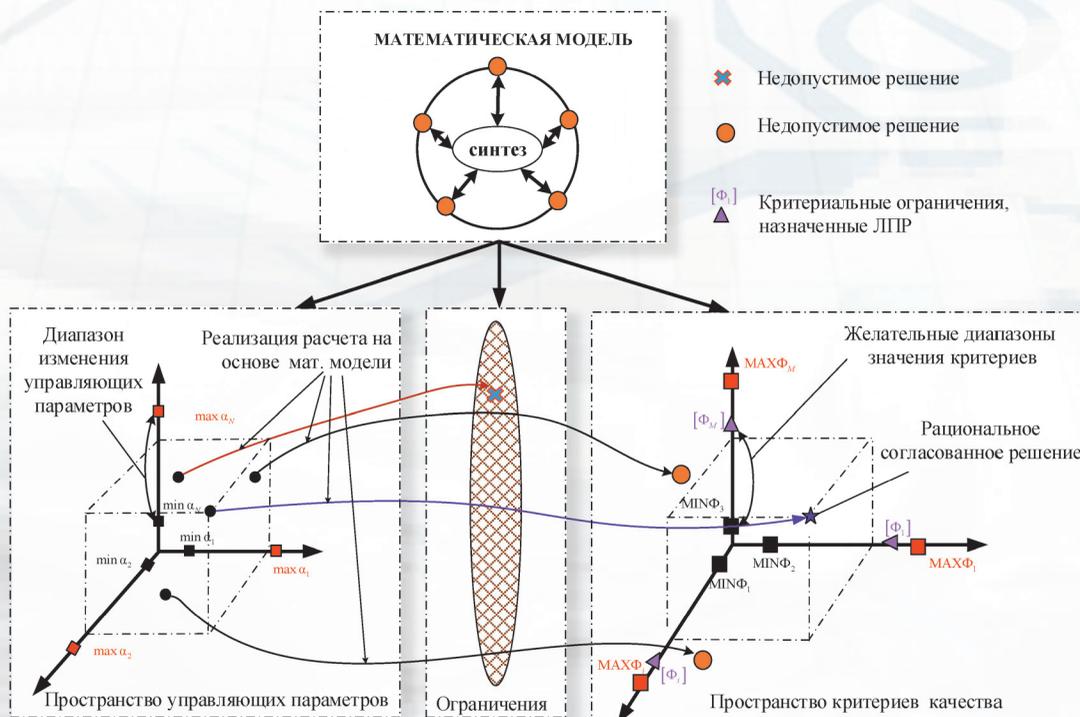


Рис. 5. Модель для автоматизированного управления процессом принятия решений при многокритериальном проектировании механизмов