

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 26

2020

№ 8

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

Рисунок к статье В. А. Бимакова, Е. В. Бимакова
**«ПОВЫШЕНИЕ СКОРОСТИ И КАЧЕСТВА АНАЛИЗА 3D-СЦЕН, СКАНИРУЕМЫХ
 ДАТЧИКАМИ АВТОНОМНОГО РОБОТА»**

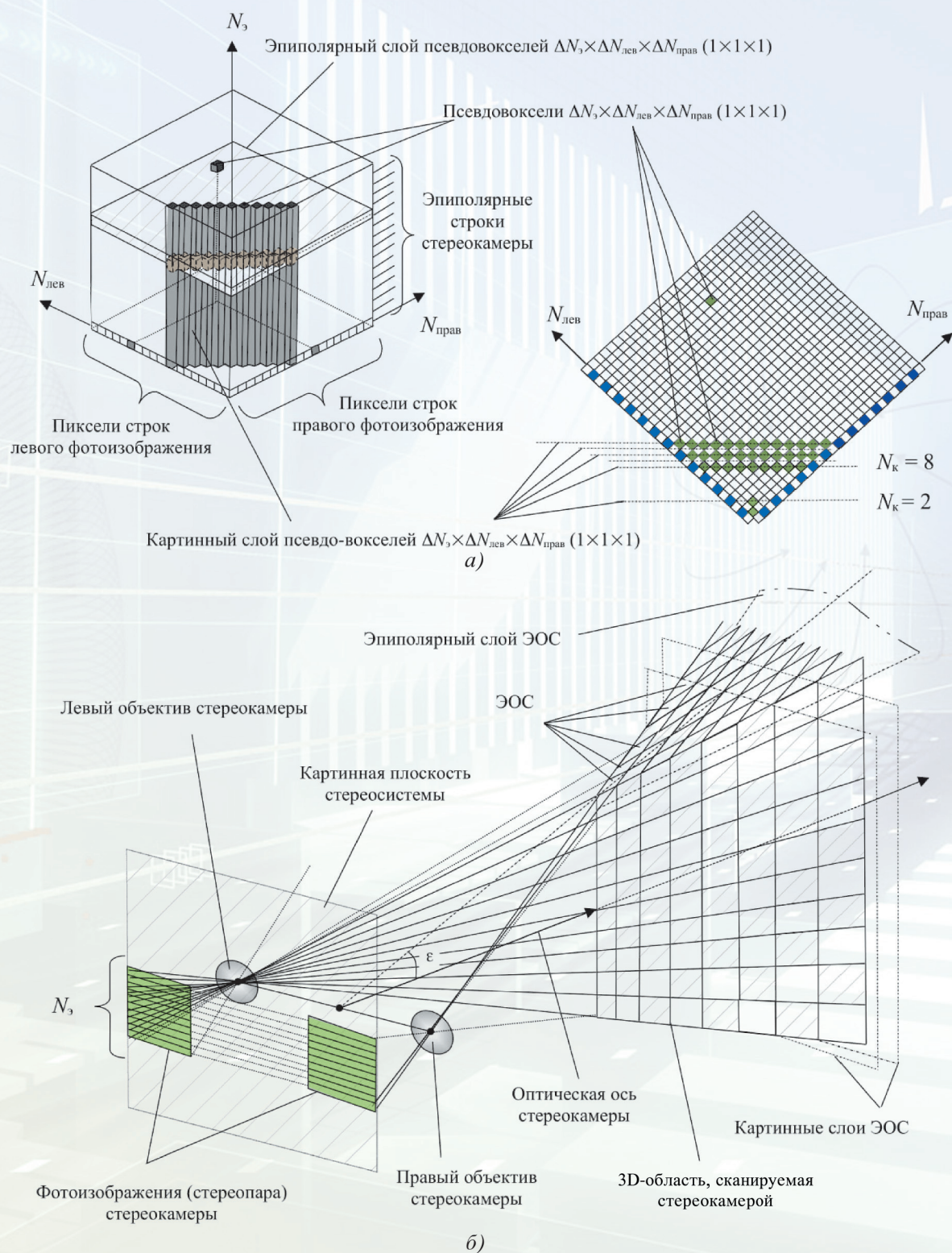


Рис. 2. Синтез воксельной модели содержимого сцены по данным стереокамеры

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 26
2020
№ 8

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

Александров А. Е., Аждер Т. Б., Степанова И. В. Вероятностная модель расчета трубопроводов по механизму вязкого и хрупкого разрушения 443

Мезенцев Ю. А., Короткова Ю. Л., Эстрайх И. В. Задача и инструменты оптимального регулирования расписаний флота авиакомпании 450

БАЗЫ ДАННЫХ

Родионов А. Н. Концептуальное и логическое моделирование данных: обнаружение и конфигурирование R -типов и n -арных отношений в предметных областях 460

ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Бимаков В. А., Бимаков Е. В. Повышение скорости и качества анализа 3D-сцен, сканируемых датчиками автономного робота 472

Вайндорф-Сысоева М. Е., Воробчикова Е. О. Модель организации профессиональной педагогической поддержки преподавателя при использовании электронных образовательных ресурсов 482

Романов П. С., Романова И. П. Методический аппарат принятия решения интеллектуальной системой управления мобильного робота при сборе ягод 488

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.
ПОЛЕЩУК 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.
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. 26
2020
No. 8

THEORETICAL AND APPLIED SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since November 1995

ISSN 1684-6400

CONTENTS

MODELING AND OPTIMIZATION

- Aleksandrov A. E., Azhder T. B., Stepanova I. V.** A Probabilistic Model for Calculating Pipelines by the Mechanism of Ductile and Brittle Fracture 443
- Mezentsev Yu. A., Korotkova Yu. L., Estrach I. V.** Problem and Tools for Optimal Regulation of Airline Fleet Schedules 450

DATABASE

- Rodionov A. N.** Conceptual and Logical Data Modeling: Detection and Configuration of R -types and n -ary Relationships in Domains 460

APPLICATION INFORMATION SYSTEMS

- Bimakov V. A., Bimakov E. V.** Improving the Speed and Quality of Analysis of 3D-Scenes Scanned by Sensors of an Autonomous Robot 472
- Vayndorf-Sysoeva M. E., Vorobchikova E. O.** Organizational Model of Professional Pedagogical Support of the Teacher in the Use of Electronic Educational Resources 482
- Romanov P. S., Romanova I. P.** Methodological Apparatus of Decision-Making and Intelligent Control of a Mobile Robot while Collecting Berries 488

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.)
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"

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ MODELING AND OPTIMIZATION

УДК 621.039.586

DOI: 10.17587/it.26.443-450

А. Е. Александров, д-р техн. наук, проф., e-mail: femsystem@yandex.ru,
Т. Б. Аждер, канд. техн. наук, доц., e-mail: azhder@yandex.ru,
И. В. Степанова, канд. геол.-мин. наук, доц., e-mail: ivs_rrr@mail.ru,
Российский технологический университет (МИРЭА)

Вероятностная модель расчета трубопроводов по механизму вязкого и хрупкого разрушения

Разработана вероятностная модель расчета разрушения трубопровода по механизму хрупкого и вязкого разрушения. Приведенная модель реализована в виде программы для ЭВМ, которая может быть использована для расчета вероятностей возникновения течей и крупномасштабного разрушения цилиндрических сосудов давления и трубопроводов под действием статических и циклических нагрузжений при переменных по толщине полях температур и напряжений. Приведены примеры параметрических расчетов для моделирования поведения трубопровода при различных условиях эксплуатации и выбранных материалах. Полученные результаты расчетов могут быть использованы для обоснования обеспечения требований концепции "течь перед разрушением", определяющих невозможность крупномасштабного разрушения трубопровода и в связи с этим сделать более безопасной его эксплуатацию.

Ключевые слова: вероятностный анализ безопасности, вероятностные методы механики разрушения, докритический и критический рост трещин, метод Монте-Карло, параметрический анализ

Введение

При эксплуатации энергетических систем, особенно объектов ядерной энергетики, одним из важнейших направлений является задача по обеспечению заданного уровня безопасности. Важное место в данном направлении занимает концепция, основанная на предварительном анализе рисков и прогнозировании аварийных ситуаций [1]. Решение такого рода задач проводится, как правило, с помощью методов моделирования и разработанных на их основе программных средств. В данной работе приводится вероятностная модель расчета трубопроводов по механизму хрупкого и вязкого разрушения, реализованная в виде программы для ЭВМ и используемая для моделирования процессов разрушения при различных условиях эксплуатации.

Системы трубопроводов относятся к числу наиболее протяженных и нагруженных конструкций, поэтому аварии таких систем приводят к наиболее тяжелым экономическим и экологическим последствиям.

Общая схема расчета трубопровода реакторной установки

Вероятностный анализ разрушения трубопровода предполагает реализацию нескольких этапов проведения расчетов, которые представлены на рис. 1.

Предварительно выбранный трубопровод разбивается на конструктивные элементы (КнЭ). Характерная особенность КнЭ состоит в том, что в рамках выделенного геометрического объема развитие трещины не выходит за его границы, т.е. достижение трещиной границы КнЭ означает, что размер ее достиг предельно допустимого критического размера. Это требование к выбору КнЭ позволяет определить полную вероятность разрушения анализируемой конструкции, объединяя вероятности разрушения КнЭ в соответствии со структурной схемой конструкции.

В разработанной программе поддерживаются следующие типы КнЭ: прямой участок, сварное соединение, гиб (отвод гнутый, сварное колено). Тип выбранного КнЭ определя-

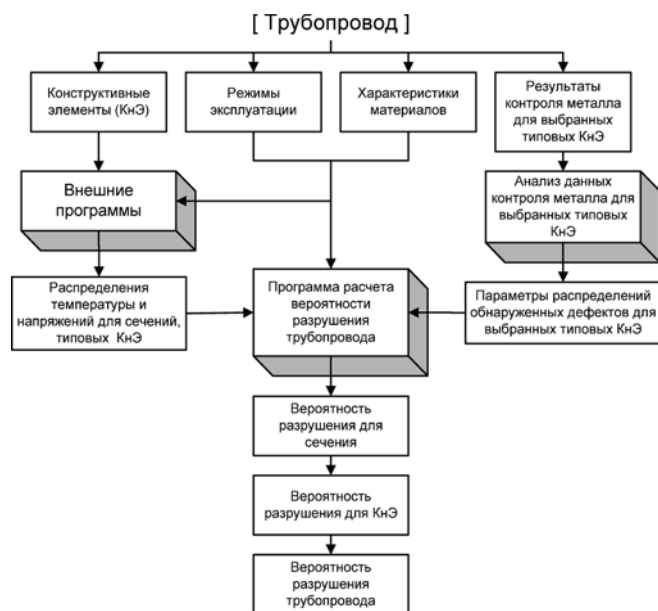


Рис. 1. Общая схема расчета вероятности разрушения трубопровода

ет доступные методы расчета, используемые в программе.

Для каждого из выделенных КнЭ задаются исходные данные, включающие режимы эксплуатации, характеристики материалов, а также результаты проводимого контроля металла (дефектность металла). Для выбранного КнЭ задаются также возможные траектории развития трещин, вдоль которых с помощью внешних программных средств рассчитываются температурные поля и напряжения. Все эти данные передаются в программу как исходные, на основе которых определяется условная вероятность разрушения рассматриваемого КнЭ для заданной траектории развития трещин. Используя полученные данные условной вероятности разрушения для каждого КнЭ, можно рассчитать суммарную вероятность разрушения исследуемого трубопровода. Следует заметить, что если КнЭ образуют последовательно соединенную структурную схему исходной конструкции, то разрушение (отказ) любого КнЭ трубопровода приводит к разрушению (отказу) всего трубопровода.

Для анализа безопасности трубопровода экспертами предварительно формируются расчетные события, моделирующие сценарий процесса его эксплуатации. Расчетные события включают режимы эксплуатации, их сочетания в виде отдельных последовательностей, которые образуют циклограммы, число циклограмм и частоту их появления в процессе эксплуатации. В свою очередь, сами расчетные события характеризуются частотой появления. В этом случае вероятность безотказной работы

трубопровода может быть найдена по теореме умножения независимых событий — не отказов каждого из выделенных элементов. Условную вероятность отказа (разрушения) всего трубопровода $P_{fr_i}(\tau)$ для i -го расчетного события можно найти из следующего соотношения:

$$P_{fr_i}(\tau) = 1 - \prod_{j=1}^M (1 - P_{j/fr_i}), \quad (1)$$

где τ — время эксплуатации трубопровода; $P_{fr_i}(\tau)$ — условная вероятность отказа всего трубопровода при реализации i -го расчетного события; $P_{j/fr_i}(\tau)$ — условная вероятность отказа (разрушения) j -го конструктивного элемента при условии реализации i -го расчетного события; fr_i — частота появления i -го расчетного события; M — число конструктивных элементов, входящих в описание анализируемого трубопровода.

Если известна частота появления расчетного события fr_i , то вероятность отказа (разрушения) всего трубопровода может быть найдена следующим образом:

$$P_{\Sigma}(\tau) = \sum_{i=1}^N fr_i P_{fr_i}(\tau), \quad (2)$$

где N — число расчетных событий, определяемых экспертами заданный сценарий эксплуатации трубопровода.

Математическая модель

Математическая модель, используемая в программе, основана на уравнениях механики разрушения, в частности, механики тел, содержащих трещины, и включает математическое описание стадий их докритического и критического роста.

Докритический рост трещин рассматривался в виде циклического подрастания, определяемого уравнением Пэрриса:

$$\frac{da}{dN} = A_0 C_0 (\Delta K_{eff})^m, \quad (1)$$

где $\Delta K_{eff} = \frac{\Delta K}{\sqrt{1-R}}$, $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ — размах коэффициента интенсивности напряжений в пределах цикла; A_0 , C_0 , m — экспериментальные коэффициенты для данного материала и среды; R — коэффициент асимметрии цикла, который рассчитывается по формуле $R = \frac{K_{min}}{K_{max}}$.

В свою очередь, критический рост трещин был промоделирован по механизму хрупкого или вязкого разрушения.

Согласно работе [2] хрупкое разрушение имеет стохастическую природу и может быть описано на основе теории наислабейшего звена. Поэтому при расчете хрупкого разрушения было использовано трехпараметрическое распределение Вейбулла:

$$P_f = 1 - \exp \left[- \left(\frac{K_1 - K_{\min}}{K_0(T)^L - K_{\min}} \right)^4 \right], \quad (2)$$

где P_f — вероятность хрупкого разрушения при значении коэффициента интенсивности напряжений K_1 ; $K_{\min}$ — минимальное значение вязкости разрушения, независящее от размера образца (точнее от длины фронта трещины) и температуры испытаний; $K_0(T)^L$ — параметр масштаба, зависящий от размера образца и температуры.

Параметр масштаба $K_0(T)^L$ для заданной температуры T и заданного характерного размера L рассчитывался по формуле

$$K_0(T)^L = K_{\min} + (\overline{K_{IC}}(T) - K_{\min}) \left(\frac{L_0}{L} \frac{1}{(-\ln(1 - \overline{P}_f))} \right)^{1/4}, \quad (3)$$

где $\overline{K_{IC}}(T)$ — базовая температурная зависимость вязкости разрушения при заданном уровне вероятности $\overline{P}_f$ и для стандартного образца размера L_0 (определяется по экспериментальным данным для заданного материала).

При моделировании процессов хрупкого разрушения значения $\overline{K_{IC}}(T)$ вводятся в программу в виде таблицы как исходные данные.

Для расчета коэффициента интенсивности напряжений K_1 было использовано напряжение, приведенное к равномерному, которое рассчитывалось на основе значений напряжений, передаваемых из внешних программ. В этом случае напряженное состояние и температура по толщине стенки КнЭ могут иметь произвольные законы распределения.

При расчете вязкого разрушения были использованы инженерные методы (коллапс нетто-сечения): метод предельной пластической нагрузки (ППН) и метод локального разрушающего напряжения (ЛРН). Предельное состояние в этом случае определялось в соответствии с условием, что приложенная к конструктивному элементу с трещиной нагрузка превышает значение напряжения течения σ_f (разрушающего напряжения). Величина σ_f для материала рассчитывалась как величина, лежащая между значениями пределов текучести $R_{p0,2}$ и прочно-

сти R_m . Конкретный способ расчета предельной нагрузки и величины σ_f определяется выбранным методом расчета. В разработанной программе были реализованы все инженерные методы расчета вязкого разрушения, приведенные в национальном стандарте [3], включая:

- метод ЛРН (KWU) для поверхностной окружной трещины;
- метод ЛРН (KWU) для сквозной окружной трещины;
- метод ППН (MP-125) для поверхностной окружной трещины;
- метод ППН (MP-125) для сквозной окружной трещины;
- метод ВМІ для поверхностной осевой трещины;
- метод ВМІ для сквозной осевой трещины;
- метод МР-125 для поверхностной осевой трещины;
- метод МР-125 для сквозной осевой трещины;
- метод МРА(KCV) для поверхностной осевой трещины;
- метод МРА(KCV) для сквозной осевой трещины;
- метод расчета напряжения течения для сквозной осевой трещины в отводе гнупом.

Для выбора наиболее консервативного результата и учета неопределенностей может быть использован мажоритарный подход. В этом случае проводится серия расчетов из перечисленного набора методов и выбирается наиболее консервативный результат.

Методической основой для расчета вероятности как вязкого, так и хрупкого разрушения является метод Монте-Карло. Несомненным преимуществом используемого метода является простота его реализации применительно к произвольным, в том числе и нелинейным процессам. Это позволяет без особых сложностей сопровождать разработанное программное обеспечение и вносить в него изменения по мере необходимости, оставляя основную конструкцию программы не тронутой.

Используемые в исходной модели случайные параметры моделируются на основе заданных исходных распределений. Расчет вероятности разрушения элемента трубопровода включает проведение заданного предварительно числа статистических экспериментов. В ходе каждого отдельного эксперимента рассчитывается вероятность разрушения для выбранного КнЭ трубопровода (основной металл или сварное соединение), исследуемого режима эксплуатации и всех типов исследуемых в расчете трещин. Результатом расчета является плот-

ность распределения вероятности разрушения, а также математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение.

Особое внимание при работе с программой уделено формированию случайных распределений размеров дефектов и его изменению, вызванного различными процессами при эксплуатации исследуемого трубопровода. Для этой цели разработана библиотека функций, позволяющая менять исходное распределение дефектов в соответствии с задаваемыми условиями эксплуатации. На основе экспериментально полученных значений размеров обнаруженных дефектов и характеристик прибора по контролю металла, первоначально формируется распределение в виде кусочно-постоянной функции $g_0(a_i)$ с переменным шагом на интервале допустимых в рамках проводимого расчета размеров дефектов, где a_i — размер дефекта для i -го интервала. Полученный массив значений $g_0(a_i)$ корректируется с учетом вероятности обнаружения дефекта заданного размера. Для этого используется функция $Pfunc(a)$, известная для используемого метода контроля. Модификация исходного распределения в целях учета необнаруженных дефектов выполняется по формуле

$$g(a_i) = \frac{g_0(a_i)}{Pfunc(a_i)}. \quad (4)$$

В результате формируется массив значений действительных размеров дефектов $g(a_i)$.

Для корректировки плотности дефектов вычисляется интеграл от функции $g(a_i)$ на интервале $(a_{\min}, s)$:

$$k = \frac{N}{M} = \int_{a_{\min}}^s g(a)da \geq 1, \quad (5)$$

где $a_{\min}$ — чувствительность используемого метода контроля;

s — толщина стенки трубопровода,

M — число обнаруженных дефектов в контрольном объеме,

N — число действительных дефектов в контрольном объеме.

Корректировка плотности дефектов ρ проводится согласно формуле

$$\rho = k\rho_0, \quad (6)$$

где ρ — плотность действительных дефектов; ρ_0 — плотность обнаруженных дефектов.

Далее таблица значений действительных размеров трещин нормируется в соответствии с формулой

$$\overline{g(a_i)} = \frac{g(a_i)}{\int_{a_{\min}}^s g(a)da}, \quad (7)$$

где $\overline{g(a_i)}$ — нормированное значение распределения действительных размеров дефектов.

Исходная выборка дефектов формируется на основе данных, полученных перед эксплуатацией объекта в результате проведения входного или предэксплуатационного контроля. Если размер дефекта превышает заданное предельное значение a_{rem} , дефект ремонтируется. В этом случае проводится корректировка распределения в следующей последовательности: для интервала, расположенного левее значения a_{rem} , корректировка не проводится, а для интервала, расположенного правее a_{rem} , корректировка проводится по формуле

$$g_{rem}(a_i) = g(a_i)(1 - Pfunc(a_i)), \quad (8)$$

где $g_{rem}(a_i)$ — плотность распределения действительных размеров с учетом ремонта при входном или/и предэксплуатационном контроле.

Далее таблица значений действительных размеров с учетом ремонта при входном или/и предэксплуатационном контроле нормируется в соответствии с формулой:

$$\overline{g_{rem}(a_i)} = \frac{g_{rem}(a_i)}{\int_{a_{\min}}^s g_{rem}(a_i)da}, \quad (9)$$

где $\overline{g_{rem}(a_i)}$ — нормированное значение распределения действительных размеров трещин с учетом ремонта.

Корректировка плотности дефектов, вызванная проведением контроля металла и последующим ремонтом, проводится в соответствии с зависимостями

$$k_{rem} = \int_{a_{\min}}^s g_{rem}(a_i)da, k \leq 1, \quad (10)$$

$$\rho_{rem} = \rho k_{rem}, \quad (11)$$

где ρ_{rem} — плотность дефектов с учетом ремонта.

Обнаруженные при эксплуатации дефекты могут иметь различный механизм образования: это могут быть технологические дефекты (пора, непровар, подрез сварного соединения и т. д.) или дефекты, образовавшиеся в период эксплуатации (трещины усталостные, коррозионные и т. д.). Независимо от механизма образования дефектов при проведении расчетов все обнаруженные дефекты приводятся к расчетным трещинам. Используемая в настоящее время схе-

матизация полученных при проведении неразрушающего контроля дефектов [4] предполагает представление их в виде эллипса (если это поверхностная трещина) или в виде полуэллипса (если это поверхностная трещина). Расположение трещины формируется таким образом, что малая ось совпадает с направлением толщины стенки и называется глубиной трещины. Ориентация трещин может быть осевой (продольная трещина) или окружной (поперечная трещина).

Методически программа построена таким образом, что вначале рассчитывается вероятность разрушения контрольного объема от единичной трещины, а затем с учетом действительного числа трещин в контрольном объеме рассчитывается вероятность разрушения произвольного объема, в котором находятся n трещин. Эта процедура получила название "процедура масштабирования".

Процедура масштабирования

Если в объеме V находится N трещин, то вероятность разрушения рассматриваемого объема составит

$$P_f(N) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{fi}), \quad (12)$$

где $P_f(N)$ — вероятность разрушения рассматриваемого объема V , в котором находятся N трещин; P_{fi} — вероятность разрушения объема V от i -й трещины.

Выберем среди всех рассматриваемых трещин такую, которая имеет наибольшую вероятность разрушения P_f и будем считать, что для всех N трещин вероятность разрушения одинакова и равна значению P_f . В этом случае полученное значение вероятности разрушения объема V будет иметь консервативное значение. Для этого случая рассмотрим два варианта: 1-й вариант — когда выполняется условие $P_f \ll 1$, и 2-й вариант — когда условие $P_f \ll 1$ не выполняется. Для 1-го варианта вероятность разрушения объема V , имеющего N трещин, составит

$$P_f(N) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{fi}) = 1 - (1 - P_f)^N = NP_f. \quad (13)$$

События вида "в объеме V содержится n трещин", где $n = 0, 1, \dots, \infty$, образуют полную группу событий, так как сумма вероятностей этих событий равна 1, а сами события попарно несовместны. Тогда, используя формулу полной вероятности, получим:

$$P_{fV} = \sum_{n=0}^{\infty} P(n) P_f(n), \quad (14)$$

где P_{fV} — вероятность разрушения объема V ; $P_f(n)$ — вероятность разрушения объема V , если в нем содержится n трещин; $P(n)$ — вероятность нахождения n трещин в объеме V .

Заметим, что вероятность $P(n)$ нахождения n трещин в объеме V является случайной величиной, распределенной по закону Пуассона [5]:

$$P(N/\rho) = \frac{\rho^N}{N!} \cdot \exp(-\rho), \quad (15)$$

где $P(N/\rho)$ — интегральная функция распределения вероятности нахождения числа трещин N при условии заданной плотности трещин ρ ; параметр ρ равен математическому ожиданию числа трещин, распределенных по закону Пуассона.

Подставив в формулу (14) значение $P(n)$ в соответствии с формулой (15), а вместо выражения $P_f(n)$ — его значение, взятое из формулы (13), получим

$$P_{fV} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\rho^n}{n!} \exp(-\rho) n P_f = \bar{n} P_f = \rho V P_f, \quad (16)$$

где V — рассматриваемый объем; $\bar{n}$ — математическое ожидание числа трещин, полученное из закона распределения Пуассона.

В случае если условие $P_f \ll 1$ не выполняется, необходимо использовать вместо соотношения (13) следующую зависимость:

$$P_f(N) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{fi}) = 1 - (1 - P_f)^N, \quad (17)$$

а вместо (16) — зависимость

$$P_{fV} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\rho^n}{n!} \exp(-\rho) [1 - (1 - P_f)^n]. \quad (18)$$

Число членов ряда n выбирается из условия обеспечения заданной точности расчетов.

Пример расчета с использованием разработанной программы

Используя разработанную программу, можно моделировать различные ситуации, в том числе и аварийные, прогнозируя их развитие и оценивая риски. Ниже приведены результаты параметрических расчетов вероятности разрушения трубопровода (внутренний диаметр $D = 0,346$ м; толщина стенки $S = 0,04$ м) для различных исходных данных. Исходные данные для проводимых расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

№	1. Характеристики средств контроля			
	Коэффициент достоверности методов контроля, 1/м	Чувствительность средств контроля, мм	Граничная глубина дефекта, выше которой проводится ремонт трубопровода, мм	
1	60	0,5	3	
	2. Описание трещин			
	Тип трещин	Ориентация трещин	Число трещин на ед. длины, 1/м	
2	Полуэллиптическая	Осевая	5,4	
	3. Распределение трещин по размерам, логнормальное			
	Распределение глубин, мм		Распределение длин, мм	
	Логарифмическое матожидание	Логарифмическое стандартное отклонение	Логарифмическое матожидание	Логарифмическое стандартное отклонение
3	0,15	0,73	1,24	0,75

Таблица 2

№	Характеристика материала, напряжение течения, МПа		Внешняя нагрузка	
	Математическое ожидание	СКО, 10 % от математического ожидания	Среднее по толщине напряжение, МПа	Средняя по толщине температура, °С
1	300	30	50	350
2	280	28	76	350
3	250	25	100	350
4	230	23	125	350
5	220	22	150	350
6	200	20	175	350
7	180	18	200	350
8	160	16	300	350

В качестве варьируемых параметров были выбраны характеристики материала и значения внешней нагрузки, приведенные в табл. 2.

На рис. 2 приведены результаты расчетов вероятности течи и вязкого разрушения в зависимости от характеристики материала. В качестве такой характеристики было использовано напряжение течения, задаваемое в виде случайного нормального распределения.

Среднее квадратичное отклонение принималось равным 10 % от значения матожидания. Внешняя нагрузка для данной серии расчетов принималась следующей: среднее по толщине

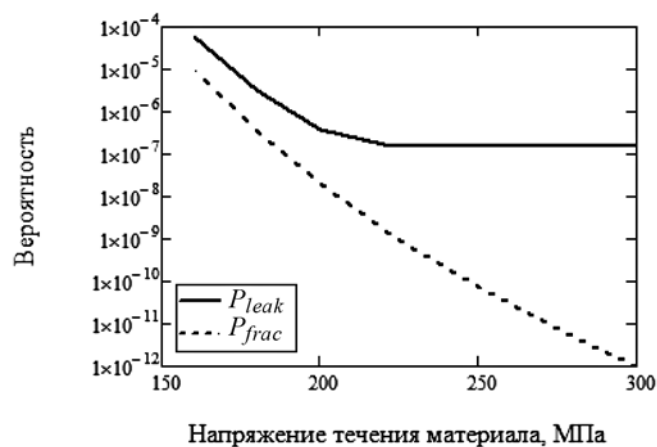


Рис. 2. Зависимость вероятности течи P_{leak} и разрушения P_{frac} трубопровода от характеристики материала — напряжения течения σ_f , МПа

напряжение $p = 76$ МПа; средняя по толщине температура $T = 350$ °С. Как следует из рис. 2, при ухудшении свойств материала (при уменьшении значения напряжения течения) различие между вероятностью течи и разрушения становится незначительным. Этот момент необходимо учитывать при использовании концепции "течь перед разрушением", которая обосновывает невозможность катастрофического разрушения трубопровода при эксплуатации [6]. Одним из важнейших требований при реализации этой концепции является определение условий, при которых возможна течь, но не наступает полное разрушение трубопровода. Раннее обнаружение течи позволяет принять своевременные меры и избежать крупномасштабного разрушения трубопровода. Подробное изложение подходов и особенностей применения концепции "течь перед разрушением" представлено в документах МАГАТЭ [7].

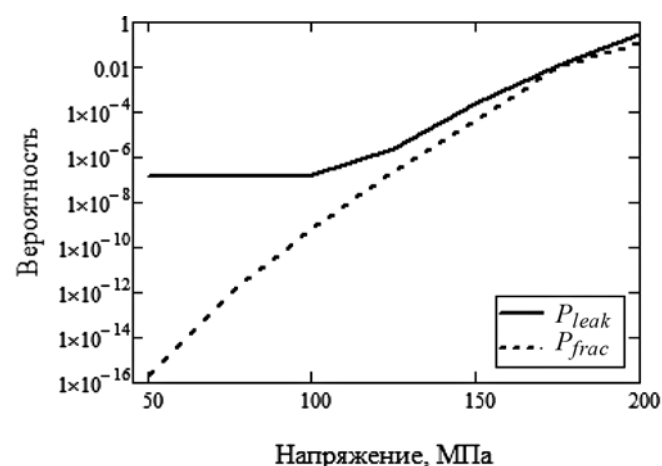


Рис. 3. Зависимость вероятности течи P_{leak} и разрушения P_{frac} трубопровода от внешней нагрузки p , МПа, $T = 350$ °С, при заданной характеристике материала σ_f (матожидание 300 МПа, СКО = 30 МПа)

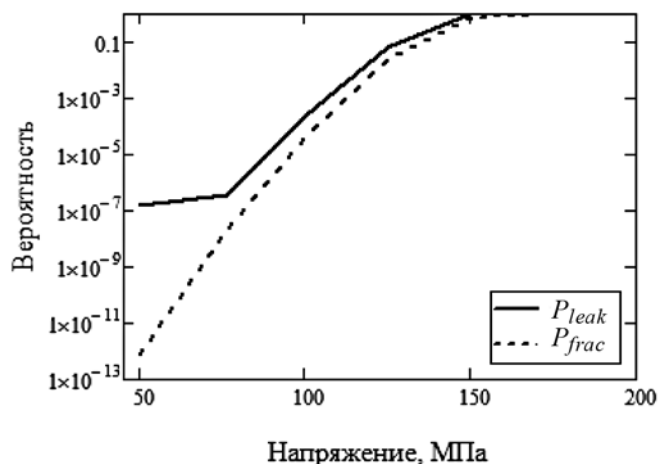


Рис. 4. Зависимость вероятности течи P_{leak} и разрушения P_{frac} трубопровода от внешней нагрузки p , МПа, $T = 350^\circ\text{C}$, при заданной характеристике материала σ_f (матожидание 200 МПа, СКО = 20 МПа)

Из представленной на рис. 2 зависимости можно определить требуемые характеристики материала при заданном уровне безопасной эксплуатации трубопровода.

На рис. 3 и 4 приведены результаты расчетов вероятности течи и вязкого разрушения в зависимости от внешней нагрузки для выбранных значений характеристик материала, которые также могут быть использованы для выбора условий эксплуатации и оценки рисков аварийных ситуаций. Следует заметить, что список варьируемых параметров может быть существенно расширен.

Заключение

Разработана вероятностная модель расчета разрушения трубопровода по механизму хрупкого и вязкого разрушения. Приведенная модель реализована в виде программы для ЭВМ, которая может быть использована для расчета вероятностей возникновения течей и крупномасштабного разрушения цилиндрических сосудов давления и трубопроводов под действием статических и циклических нагружений при переменных по толщине полями температур и напряжений.

Математическая модель, используемая в программе, основана на уравнениях механики разрушения, в частности, механики тел, содержащих трещины, и включает математическое описание стадий их докритического и критического роста.

Докритический рост трещин рассматривался в виде циклического подрастания, определяемого уравнением Пэрриса.

Критический рост трещин моделировался по механизму хрупкого или вязкого разрушения. Для расчета хрупкого разрушения было использовано трехпараметрическое распределение Вейбулла. Значения базовой температурной зависимости вязкости разрушения при заданном уровне вероятности и для стандартного образца, которые определяются по экспериментальным данным для заданного материала, вводятся в программу в виде таблицы как исходные данные.

При расчете вязкого разрушения были использованы инженерные методы (коллапс нетто-сечения): метод пластической нагрузки и метод локального разрушающего напряжения. В разработанной программе были реализованы все инженерные методы расчета вязкого разрушения, приведенные в национальном стандарте ГОСТ Р 58328—2018.

Особое внимание при работе с программой было уделено формированию случайных распределений размеров дефектов и его изменению, вызванному различными процессами при эксплуатации исследуемого трубопровода. Для этой цели разработана библиотека функций, позволяющая менять исходное распределение дефектов в соответствии с задаваемыми условиями эксплуатации.

Приведены примеры параметрических расчетов для моделирования поведения трубопровода при различных условиях эксплуатации и выбранных материалах. Полученные результаты расчетов могут быть использованы для обоснования обеспечения требований концепции "течь перед разрушением", определяющих невозможность крупномасштабного разрушения трубопровода.

Список литературы

1. Анализ риска и проблемы безопасности. В 4-х частях // Ч.1. Основы анализа и регулирования безопасности: Науч. руковод. К. В. Фролов. М.: МГФ "Знание", 2006. 640 с.
2. Wallin K. The scatter in K_{IC} result // *Eng. Fract. Mech.* 1984. Vol. 19. P. 1085—1095.
3. Национальный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р 58328—2018. Трубопроводы атомных станций. М.: Стандартинформ, 2019. 73 с.
4. Методические рекомендации. МР 125-02-95. Правила составления расчетных схем и определение параметров нагруженности элементов конструкций с выявленными дефектами. М.: ЦНИИТМАШ, 1995.
5. Унифицированная процедура оценки оборудования и трубопроводов АЭС с РУ ВВЭР на протяжении срока службы. VERLIFE — версия 2008. 2008 г.
6. Гетман А. Ф. Концепция безопасности "течь перед разрушением" для сосудов и трубопроводов давления АЭС. М.: Энергоатомиздат. 1999. 258 с.
7. International Atomic Energy Agency. Applicability of the leak before break concept. IAEA-TECDOC-710. Vienna, 1993.

A. E. Aleksandrov, Ph.D., Professor, e-mail: femsystem@yandex.ru,
T. B. Azhder, Ph.D., Associate Professor, e-mail: azhder@yandex.ru,
I. V. Stepanova, Ph.D., Associate Professor, e-mail: ivs_rrr@mail.ru
Moscow Technological University (MIREA), 107996, Moscow, Russian Federation

A Probabilistic Model for Calculating Pipelines by the Mechanism of Ductile and Brittle Fracture

A probabilistic model for calculating the failure of the pipeline by the mechanism of brittle and ductile fracture is developed. The presented model is implemented in the form of a computer program, which can be used to calculate the probabilities of leaks and large-scale fracture of cylindrical pressure vessels and pipelines under the action of static and cyclic loads with temperature and stress fields varying in thickness. Examples of parametric calculations for modeling the behavior of the pipeline under various operating conditions and selected materials are given. The results of the calculations can be used to justify the requirements of the "leak before destruction" concept, which determine the impossibility of large-scale fracture of the pipeline and, therefore, make its operation safer.

Keywords: probabilistic safety analysis, probabilistic methods of fracture mechanics, subcritical and critical crack growth, Monte Carlo method, parametric analysis.

DOI: 10.17587/it.26.443-450

References

1. **Risk** analysis and security issues. In 4 parts. Part 1. Fundamentals of safety analysis and regulation: Scientific adviser K. V. Frolov, Moscow, MGF Znanie, 2006, 640 p. (in Russian).
2. **Wallin K.** The scatter in K_{IC} result, *Eng. Fract. Mech.*, 1984, vol. 19, pp. 1085–1095.
3. **National** standard of the Russian Federation. GOST R 58328–2018. Piping of nuclear power plants, Moscow, Standartinform, 2019, 73 p. (in Russian).

4. **Guidelines.** MR 125-02-95. Rules for drawing up design schemes and determining the load parameters of structural elements with identified defects. TSNIITMASH, Moscow, 1995 (in Russian).
5. **VERLIFE** Unified procedure for lifetime assessment of components and piping in WWER NPPs during operation, 2008.
6. **Getman A. F.** Leak Before Break, Safety Concept for NPP Pressure Vessels and Piping, Energoatomizdat, Moscow, 1999 (in Russian).
7. **International** Atomic Energy Agency, Applicability of the leak before break concept, IAEA-TECDOC-710, Vienna, 1993.

УДК 519.854.3-6

DOI: 10.17587/it.26.450-459

Ю. А. Мезенцев, д-р техн. наук, e-mail: mesyan@yandex.ru,
Ю. Л. Короткова, e-mail: juliapetrulina@yandex.ru,
И. В. Эстрайх, e-mail: ive7@yandex.ru,
Новосибирский государственный технический университет

Задача и инструменты оптимального регулирования расписаний флота авиакомпании^{1,2}

Рассматривается задача оптимального регулирования назначений воздушных судов по рейсам авиакомпании. Оптимальное управление расписаниями заключается в таком составлении или изменении расписаний, которое минимизирует увеличение общей длины расписания либо потери системы от нарушений заданных графиков вылета воздушных судов. Данная задача является NP-трудной и не имеет эффективных алгоритмов точного решения. Приведен подробный обзор подходов к решению модификаций этой задачи и смежных задач управления флотом. Представлены оригинальные формальная постановка задачи и способы решения. Приведена статистика тестирования программных реализаций ее решения, доказывающая фактическую эффективность разработанного инструментария.

Ключевые слова: оптимальное регулирование расписаний, критерий быстроедействия, алгоритм бинарных отсечений и ветвлений

Введение

Проблема назначения воздушных судов (ВС) заключается в принятии решения о том,

какой борт должен быть назначен на каждый рейс (так называемый сегмент или плечо) в расписании. Сегменты, назначенные на одно ВС, представляют собой набор последовательных перелетов с попарной стыковкой в аэропортах вылета и прилета и называются графиком движения ВС. На момент принятия решения о назначении бортов тип ВС для

¹Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 19-37-90012.

²Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ, проект FSUN-2020-0009.

каждого рейса уже определен. Распределение типов ВС по направлениям — это отдельная задача, решаемая на этапе стратегического планирования расписания исходя из ожидаемого спроса на направления и ограничений по парку ВС (Fleet Assignment Modeling). Основные ограничения, которые необходимо учитывать при назначении самолета на рейсы — это ограничения по периодичности технического обслуживания (ТО) и ограничения, связанные с наличием допусков на полеты того или иного типа ВС в заданный аэропорт.

Задача назначения ВС на рейсы является лишь одной из больших и сложных задач планирования, решаемых коммерческими авиакомпаниями на регулярной основе. Так, один из средних авиаперевозчиков РФ выполняет и планирует около 360 рейсов в день в 80 городов 40 стран, используя около 100 самолетов 11 различных типов.

Задачи, связанные с планированием и управлением расписаниями авиакомпаний, могут быть разделены на последовательные подзадачи [1]:

- синтез расписания;
- назначение типов ВС по направлениям;
- маршрутизация ВС;
- планирование экипажей.

Процесс назначения ВС на рейсы выполняется, как правило, на этапе формирования тактического плана выполнения полетов (маршрутизации ВС). Однако, когда происходит отклонение фактического графика полетов от запланированного, необходимо оперативное принятие решения о корректировке (восстановлении) расписания.

1. Подходы к решению задач, связанных с переназначением ВС и отработкой нарушений планового расписания

Исследование задач восстановления расписаний авиарейсов в случаях отклонения от заданного плана началось в 1980-х гг. Так, D. Teodorović и S. Guberinic были одними из первых, кто в 1984 г. исследовал задачу назначения ВС по рейсам и восстановления расписания при отклонении от планового графика в целях минимизации задержек пассажиров. Решение было основано на применении метода ветвей и границ [2].

В 1990 г. D. Teodorović, G. Stojkovic применили жадный эвристический алгоритм для формирования нового суточного плана полетов

с учетом проблемы нехватки ВС по критерию минимизации числа отмененных рейсов и задержек [3]. Они разработали эвристический алгоритм, который протестировали на маленькой выборке из 14 ВС и 80 рейсов. Спустя 5 лет [4] авторы расширили задачу, включив в рассмотрение ограничения по экипажам. Они разработали эвристический алгоритм, основанный на принципе FIFO при планировании рейсов и динамическом программировании.

В 1993 г. A. I. Z. Jarrah и др. разработали систему поддержки принятия решений для авиадиспетчеров ЦУП авиакомпании United Airlines [5]. В основу были положены две сетевые модели, содержащие в себе дуги, соответствующие рейсам, обслуживанию ВС на земле, а также ночевкам в базовых аэропортах. Одна модель была использована для определения необходимости отмены рейса, другая — для определения изменения времени вылета и прилета рейсов. Принятие решение основывалось на минимизации расходов, связанных с задержками и отменами рейсов. Идеи A. I. Z. Jarrah находят продолжение в работах J. M. Cao и A. Kanafani, которые занимались разработкой системы принятия решений, способной работать в режиме реального времени [6]. Подход к решению заключался в поиске компромисса между отменой и задержкой рейса с учетом функции максимизации выручки за вычетом расходов на задержки и отмены. При решении рассматривались варианты с заменой типа ВС на рейсе или необходимостью перегона ВС к месту назначения из другого аэропорта.

Стоит отметить исследования K. T. Talluri [7] в 1996 г. (разработка эвристического алгоритма принятия решений о замене типа ВС на рейсе по критерию минимизации расходов), S. Yan и D.-H. Yang (формирование графика рейсов после нарушения расписания при использовании симплекс-метода и лагранжевой релаксации [8]), а также S. Yan и Y. P. Tu (отработка нарушений планового расписания при выполнении многоплечевых рейсов для парка с несколькими типами ВС [9]).

Одна из интересных работ с точки зрения выбранной целевой функции была представлена в 1997 г. S. Lou, G. Yu [10]. Они занимались проблемой регулярности и сформулировали ее как задачу целочисленного программирования по критерию минимизации процента рейсов с задержкой более 15 минут. Решение было основано на использовании LP-релаксации.

В 1997 г. М. F. Argüello et al. разработали эвристический алгоритм жадного случайного поиска новых маршрутов ВС в случае задержки в целях минимизации расходов, связанных с переназначениями и отменами рейсов [11]. При этом в основу решения была заложена сеть, содержащая два измерения — временные интервалы и аэропорты (Time-Band Network). В 2000 г. авторы использовали метод ветвей и границ и LP-релаксацию для минимизации расходов, связанных с задержками и отменами [12]. В этом же году часть команды исследователей (G. E. Bard, G. Yu) в соавторстве с В. G. Thengvall представили еще один подход к решению задачи восстановления расписания, в котором задержки и отмены используются для решения проблемы нехватки воздушных судов таким образом, чтобы значительная часть первоначальных маршрутов воздушных судов оставалась нетронутой. Модель была уникальной в той части, что позволяла пользователям самостоятельно задавать цель. Для решения применялся метод LP-релаксации, а в случае, когда оптимальное решение не находилось, использовалась эвристика. Тестирование показало, что в большинстве случаев решения были близкими к оптимальным [13].

В 2003 г. J. M. Rosenberger и др. [14] предложили очередной эвристический алгоритм для синтеза графиков движения ВС в рамках каждого типа ВС в отдельности. Алгоритм получил название ASR (Aircraft Selection Heuristic). В качестве целевой функции была выбрана минимизация расходов, связанных с переназначениями, задержками и отменами рейсов.

В 2004 г. Т. Andersson и Р. Varbrand [15] представили решение задачи управления задержками рейсов в целях максимизации доходов от продажи билетов. Для решения использовался метод Генерации столбцов. Тестирование осуществлялось на данных реальной авиакомпании Швеции, и результаты показали, что система может быть использована для принятия решений в режиме реального времени.

Однако нужно отметить, что большинство ранних исследований были сосредоточены на отдельных задачах, как правило, нацеленных на минимизацию расходов в случае отклонения расписания от планового. Дальнейшие исследования были направлены на решение комплексных задач, связанных не только с построением оптимального графика для ВС, но и с разрешением проблем с пассажирскими стыковками, доступностью экипажей и пр.

В 2009 г. N. Eggenberg et al. [16] применили динамическое программирование и метод Ге-

нерации столбцов для решения задачи синтеза графиков движения ВС с учетом планов по техническому обслуживанию и планируемых стыковок пассажиров по критерию минимизации расходов (операционных, а также расходов на ситуации, связанные со сбоем расписания (сбойные ситуации)).

В 2010 г. N. Jafari et al. [17] представили задачу смешанно-целочисленного программирования, цель решения которой заключалась в том, чтобы одновременно разрешить вопросы восстановления расписания и пассажирских стыковок после сбойной ситуации. Решить задачу удалось лишь на небольшом тестовом наборе данных, который содержал данные по 13 самолетам 2 типов.

В 2012 г. Bisailon et al. [18] разработали эвристический алгоритм решения задачи управления расписаниями в сбойной ситуации, сочетающую перераспределение и ВС, и пассажиров с одной целью — минимизировать эксплуатационные расходы и влияние на пассажиров. Подход к решению был улучшен в более поздних работах К. Sinclair [19, 20].

Одними из последних являются работы Y. Hu и соавторов. Еще в 2011 г. Y. Hu et al. [21] сформулировали задачу целочисленного программирования, направленную на минимизацию задержек и расходов, связанных с отменами рейсов и обслуживанием пассажиров в сбойных ситуациях. Решение выполнялось путем LP-релаксации с последующим применением эвристического алгоритма. Эта модель была протестирована на данных, которые включали 16 самолетов и 70 рейсов. В 2019 г. была опубликована статья, в которой был рассмотрен подход к решению комплексной задачи восстановления расписания и пассажирских маршрутов (при условии, что пассажир сможет сам выбрать один из вариантов — вернуть билет или изменить маршрут). В качестве целевой функции предложена минимизация общих расходов, связанных с переназначением ВС по рейсам, и затрат, связанных с изменением маршрутов по пассажирам [22].

Исходя из анализа существующих подходов к решению поставленной задачи можно сделать вывод о том, что существующие подходы к решению не гарантируют получения оптимального решения даже при обособленном рассмотрении задачи переназначения ВС. Отсутствует алгоритм нахождения оптимальных назначений для каждого ВС с доказанной эффективностью, что говорит об актуальности настоящего исследования.

2. Постановка задачи оптимального регулирования расписаний флота авиакомпании

Потребность в регулировании расписаний возникает из-за появления непредвиденных задержек вылета рейсов. Прикладная задача оптимального (оперативного) регулирования текущих графиков вылета ВС повседневно актуальна для любой авиакомпании и требует многократного решения в течение суток в реальном масштабе времени. В отличие от общей задачи составления расписаний вылетов на относительно длительный период *задача оптимального регулирования действующего расписания*, с одной стороны, имеет меньшую размерность, но с другой стороны, для регулирования расписания устанавливаются значительно более жесткие временные рамки. Ее содержательную постановку можно описать следующим образом.

Рассмотрим множество запланированных рейсов авиакомпании, которые необходимо переназначить множеству ВС (бортов) разных типов при известных (различных) длительностях всех операций (включая обслуживание в аэропортах и перелеты) таким образом, чтобы минимизировать суммарное отклонение времени выполнения всех рейсов от планового расписания (либо минимизировать максимальное отклонение по всем рейсам от исходного планового расписания).

На момент корректировки расписания известны времена выполнения и текущие задержки начала выполнения рейсов. Значения таких задержек различны для разных ВС и разных рейсов. Содержательно задача составления расписаний вылетов на сезон и задача оптимального оперативного регулирования действующего расписания мало отличаются одна от другой. Отличия касаются в основном средств решения для обеспечения должной точности и быстродействия. Поэтому рассматриваемая ниже формальная постановка задачи, по сути, является универсальной и для случая составления сезонного расписания, и для случая оперативного регулирования действующего расписания.

Существует несколько формальных постановок и подходов к решению данной задачи, в том числе предложенные авторами формализация и алгоритм решения близкой задачи с рекурсиями в условиях [23].

В данной статье описан другой альтернативный новый подход на основе формализа-

ции задачи с дизъюнкциями в ограничениях. Далее также показано его существенные преимущества в быстродействии и точности (близости к оптимумам получаемых расписаний) в сравнении с другими существующим подходами.

Примем следующие обозначения. Пусть $t_{i,j}$ — заданное время обслуживания рейса i ВС j , $T = \|t_{i,j}\|$, $j = \overline{1, J}$, $i = \overline{1, I}$; b_j и $\bar{b}_j$ — соответственно минимальное и максимальное числа рейсов, назначаемых ВС j (здесь и далее $\|\cdot\|$ обозначает вектор, матрицу или тензор соответствующей контексту размерности); $\tau_{i,j}^0$ — задержка начала выполнения i -го рейса воздушным судном j .

Если упорядочить рейсы для каждого ВС авиакомпании по возрастанию $\tau_{i,j}^0$, то $T^0 = \|\tau_{i,j}^0\|$, $j = \overline{1, J}$, $i = \overline{1, I}$ (I — общее число рейсов, J — число ВС) можно интерпретировать как расписание на входе каждого из ВС.

Обозначим $x_{i,j}$ — булевы переменные — назначения рейса i ВС j , подлежащие определению.

Введем непрерывные переменные $C_{i,j} \geq \tau_{i,j}^0$ — время вылета рейса i при назначении на ВС j , и определим номер фиктивного завершающего рейса $\bar{i}$ для каждого ВС j , $j = \overline{1, J}$, а также булевы переменные $w_{i,k,j}$ с истинностью условия следования рейса k непосредственно за рейсом i для ВС j :

$$\sum_{j=1}^J x_{i,j} = 1, \quad i = \overline{1, I}; \quad (1)$$

$$\underline{b}_j \leq \sum_{i=1}^I x_{i,j} \leq \bar{b}_j, \quad j = \overline{1, J}; \quad (2)$$

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если рейс } i \text{ назначен ВС } j, \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases} \quad (3)$$

$$C_{i,j} - C_{k,j} + t_{i,j}x_{i,j} - Mw_{i,k,j} \leq 0, \quad C_{i,j} \geq \tau_{i,j}^0; \quad (4)$$

$$C_{k,j} - C_{i,j} + t_{k,j}x_{k,j} + Mw_{i,k,j} \leq M, \quad (5)$$

$$i \neq k, i, k = \overline{1, I}, \quad j = \overline{1, J};$$

$$w_{i,k,j} = \begin{cases} 1, & \text{если рейс } i \text{ предшествует } k \\ & \text{для борта } j, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (6)$$

Условия (1)–(3) характерны для задачи о назначениях: (1) обеспечивают назначения любого рейса единственному ВС; (2) — назначения не менее $\underline{b}_j$ и не более $\bar{b}_j$ рейсов любому ВС j .

Ограничения (4)–(6) обуславливают выбор кратчайших путей посредством определения $w_{i,k,j}$ (с учетом назначений $x_{k,j}$) на полных графах связей между рейсами для каждого ВС.

Условия (4), (5) определяют, что рейсы i и k выполняются не одновременно бортом j . С их помощью реализуются логические операции "или" при выборе вариантов последовательностей выполнения рейсов. В соотношениях (4), (5) M — большое положительное число.

Для завершающего рейса каждого ВС будем иметь:

$$C_{\bar{i},j} + t_{\bar{i},j} x_{\bar{i},j} \leq C_{\max}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (7)$$

где $\bar{i}$ — номер завершающего рейса для ВС j ,

$$C_{\max} \rightarrow \min. \quad (8)$$

Условие (8) определяет критерий эффективности расписания, известный как критерий быстродействия системы параллельных несвязанных приборов с общеупотребимым обозначением $C_{\max}$.

Расписание, синтезируемое посредством решения задачи (1)—(8), полностью определяется оптимальными назначениями $x_{i,j}^*$, $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$, и фактическими значениями времени вылета каждого рейса при таких назначениях, вычисляемыми как $C_{i,j}^* x_{i,j}^*$, где $C_{i,j}^*$ — значения $C_{i,j}$ в оптимальном решении.

Определим класс и актуальные для практики размерности задачи оперативного регулирования графиков вылетов флота авиакомпании.

Класс задачи определить несложно, поскольку даже при существенном упрощении путем исключения условий (4)—(6) и, соответственно, переменных $w_{i,k,j}$ получается задача оптимизации расписаний несвязанных параллельных машин по критерию $C_{\max}$. Такая упрощенная задача, тем не менее, является NP-трудной, что показано, например, в работах [24—26].

В задаче (1)—(8) содержится IJ булевых переменных $x_{i,j}$ и IJ непрерывных переменных $C_{i,j}$. Соотношения (4), (5) и (6) добавляют $IJ \binom{2}{I} = JI^2(I-1)/2$ переменных $w_{i,k,j}$ и $2IJ \binom{2}{I} = JI^2(I-1)$ ограничений (здесь $\binom{2}{I}$ — число сочетаний из I по 2). Приведенные оценки числа переменных и ограничений формальной постановки с дизъюнкциями в ограничениях показывают, что даже без учета сложности условий (4)—(6) они многократно утяжеляют исходно труднорешаемую задачу (1)—(3), (7), (8).

Относительно актуальных размерностей реализаций задачи оптимального оперативного регулирования расписания приведем следующие оценки. Для среднего размера авиаком-

пании актуальные размерности реализаций рассматриваемой задачи лежат в интервалах: $J \in [10, 30]$, $I \in [100, 300]$. Отсюда получаем оценку числа булевых переменных $JI^2(I-1)/2 + JI = 30 \cdot 300^2 \cdot 299/2 + 30 \cdot 300 = 403\,659\,000$, т.е. более 400 миллиардов.

По этой причине использование постановки (1)—(8) для построения расписаний даже после элиминации части переменных с применением точных алгоритмов весьма затруднительно, а для задач реальной размерности невозможно из-за фактически бесконечного времени счета, что подтверждается вычислительными экспериментами с IBM CPLEX.

3. Релаксация с априорным назначением последовательностей обслуживания

Для каждого ВС упорядочиваем рейсы по возрастанию заданных задержек $\tau_{i,j}^0$. Всякую такую последовательность считаем последовательностью возможного выполнения рейсов каждым воздушным судном.

Вместо условий (4)—(6) применим следующие условия:

$$C_{i,j} \geq \tau_{i,j}^0 x_{i,j}, \quad (9)$$

где $\frac{C_{i,j}}{x_{i,j}} =$ время вылета рейса i ВС j , $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$,

$$C_{i,j} + t_{i,j} x_{i,j} \leq C_{k,j}, \quad (10)$$

если рейс i непосредственно предшествует k .

Сформулированную задачу обозначим как (1)—(3), (7)—(10).

Докажем эквивалентность постановок задачи (1)—(8) и (1)—(3), (7)—(10) при условии упорядочения рейсов для всех бортов по возрастанию исходных задержек $\tau_{i,j}^0$.

1. Рассмотрим случай $\tau_{i,j}^0 = 0$, $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$. При таких условиях оптимальное решение $C_{\max} = \lambda$, $x_{i,j}^*$, $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$, не зависит от порядка следования рейсов, поскольку ограничения (10) и (7) для $x_{i,j}^*$ справедливы при любом порядке следования, а условия (9) означают $C_{i,j} \geq 0$.

Действительно, $C_{i,j} + t_{i,j} x_{i,j}^* = C_{k,j}$, если рейс i непосредственно предшествует k . И тогда время завершения последнего рейса любого ВС

$j = \overline{1, J}$ составит величину $C_j = \sum_{i=1}^I t_{i,j} x_{i,j}^* \leq C_{\max}$. Это непосредственно означает, что при $\tau_{i,j}^0 = 0$, $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$, решения задач (1)—(3), (4)—(8) и (1)—(3), (7)—(10) совпадают.

2. Рассмотрим систему из одного ВС и упорядочим список рейсов по возрастанию величин $\tau_i^0 > 0, i = \overline{1, I}$ ($0 \leq \tau_1^0 \leq \tau_2^0 \leq \dots \leq \tau_i^0 \leq \tau_k^0 \leq \dots \leq \tau_I^0$). Рассмотрим последовательно координаты решения $C_1 = \tau_1^0, C_2 = \tau_1^0 + t_1 x_1, C_3 = \max\{\tau_2^0, C_2\} + t_2 x_2, C_{i+1} = \max\{\tau_i^0, C_i\} + t_i x_i, i = \overline{1, I}$. В общем случае, если рейс i непосредственно предшествует k , то $\max\{\tau_i^0, C_i\} + t_i x_i = C_k$. Очевидно, что для завершающего рейса I $C_I = C_{\max}$.

Изменим порядок следования рейсов i и k на обратный (k непосредственно предшествует i). Не теряя общности, будем полагать выполнение условий $\tau_k^0 \geq \tau_i^0 > C_i$. Тогда $C'_i = \tau_k^0 + t_k x_k = C_k$ и $C'_{k+1} = C'_i + t_i x_i$, откуда непосредственно следует $C'_{\max} = C_{\max} + t_i x_i$.

Если же $C_i > \tau_k^0 \geq \tau_i^0$, то значения τ_i^0 и τ_k^0 условно можно считать равными нулю. Как показано выше, в этом случае изменение порядка следования рейсов (10) не приводит к изменению значения $C_{\max}$ ($C'_{\max} = C_{\max}$).

3. Таким образом, любая замена порядка следования рейсов ВС, отличным от заданного с последовательностью $0 \leq \tau_1^0 \leq \tau_2^0 \leq \dots \leq \tau_i^0 \leq \tau_k^0 \leq \dots \leq \tau_I^0$ может привести только к увеличению общего времени обслуживания $C_{\max}$.

4. Распространим результат на общий случай $\tau_{i,j}^0 \geq 0, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$. Упорядочим задержки для каждого ВС $0 \leq \dots \leq \tau_{i,j}^0 \leq \tau_{k,j}^0 \leq \dots \leq \tau_{I,j}^0, j = \overline{1, J}$. Тогда для любого ВС замена порядка следования рейсов отличным от заданного, как это следует из п. 2, может привести только к увеличению общей длины расписания $C_{\max}$. Откуда непосредственно следует эквивалентность постановок (1)–(3), (4)–(8) и (1)–(3), (7)–(10).

В заключение раздела отмечаем снижение на много порядков размерностей задачи в актуальных приложениях. Для сравнения оценим число булевых переменных в реализации задачи: $J \in [10, 30], I \in [100, 300]; IJ = 300 \cdot 30 = 9000$.

4. Средства реализации и алгоритмы решения

Существует множество алгоритмов решения модификаций рассмотренной задачи с использованием нескольких формальных постановок. Для поиска решений используются различные подходы — от разновидностей локального поиска [24–26], аппроксимационных алгоритмов [26, 27], программирования в ограничениях [29] до точных алгоритмов, включая динамическое программирование и методы ветвей и отсечений [23, 30, 31]. Однако, несмотря на принад-

лежность к классу NP, неплохие результаты показывает применение точных численных методов оптимизации. Это относится, в частности, к развиваемому авторами алгоритму бинарных отсечений и ветвлений (АБОВ) [32, 33] и набору "классических" средств решения milp, реализованных в IBM CPLEX optimization studio и GURUBI optimization. Практические результаты применения АБОВ для решения задачи оптимизации расписаний несвязанных параллельных приборов с задержками начала обслуживания по критерию $C_{\max}$ в постановке с рекурсиями для относительно небольших размерностей (от 5×100 до 30×100) представлены в работе [31]. В этой работе также приведено сравнение применений АБОВ с параметрическими алгоритмами на основе динамического программирования с отсеком локально наилучших расписаний на каждом шаге динамического программирования, которое выявило полное преимущества АБОВ на задачах таких размерностей. В настоящей же статье далее приведены результаты тестирования модели в постановке (1)–(3), (7)–(10) посредством набора компонент IBM CPLEX optimization studio.

Тестирования модели для составления оптимальных расписаний флота авиакомпании проведено на сгенерированных исходных данных, максимально приближенных к реальным размерностям.

Использованы две группы тестов по 10 в каждой группе [34]. Первая группа содержит данные для 500 рейсов, осуществляемых 10 бортами, вторая — для 300 рейсов осуществляемых 30 бортами. Границы 10 и 30 бортов соответствуют среднему и максимальному числу ВС одного типа реальной авиакомпании. Верхние границы 300 и 500 рейсов существенно превосходят существующие потребности оперативного регулирования реальной авиакомпании. В тестах учтено, что воздушные суда могут обладать одинаковой вместимостью, но разным временем выполнения рейсов за счет различий в скорости и времени обслуживания на земле.

Структуру данных и результатов счета тестов можно описать посредством небольшого иллюстративного примера теста на составление расписания выполнения 10 рейсов тремя бортами. Исходные данные примера содержатся в табл. 1–3. Табл. 4–6 отображают оптимальное решение.

Результаты счета обеих групп тестов отражены соответственно в табл. 7 и табл. 8. В обеих таблицах графы "время" отображают время счета в формате "часы:минуты:секунды".

Таблица 1

Данные о времени $t_{i,j}$ выполнения рейсов ВС

$j \backslash i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	4	1	9	7	9	6	7	3	3
2	1	4	3	5	3	8	3	4	5	3
3	6	1	3	1	3	6	3	4	6	9

Таблица 2

Данные о задержках рейсов $\tau_{i,j}^0$ без упорядочения

$j \backslash i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	6	10	14	2	6	13	11	5	12	3
2	9	10	14	7	3	3	6	14	7	0
3	12	11	0	10	13	14	12	12	11	15

Таблица 3

Порядок $L_j = \|L_j\|$ следования задержек рейсов по возрастанию $\tau_{i,j}^0$

$j \backslash i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	4	10	8	1	5	2	7	9	6	3
2	10	5	6	7	4	9	1	2	3	8
3	3	4	2	9	1	7	8	5	6	10

Таблица 4

Оптимальные назначения рейсов $x_{i,j}^*$

$j \backslash i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
2	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1
3	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0

Таблица 5

Оптимальное время вылетов $C_{i,j}^*$

$j \backslash i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	12	12	15	0	12	15	12	5	12	5
2	14	15	15	14	3	6	14	15	14	0
3	12	11	0	10	15	15	12	15	12	15

Таблица 6

Время начала выполнения назначенных рейсов $C_{i,j}^* x_{i,j}^*$

$j \backslash i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0	0	5	12	5
2	14	0	0	0	3	6	0	0	0	0
3	0	11	0	10	0	0	12	0	0	0

Графы $C_{\max}$ содержат достигнутые значения критерия эффективности для каждого теста. Графы "Макс. откл." отражают максимальное возможное отклонение полученного решения от оптимума в процентах значения $C_{\max}$.

Таблица 7

Результаты счета тестовых задач (500 рейсов 10 ВС)

Номер теста	Имя теста	Время (ч:мм:сс)	$C_{\max}$	Макс. откл. (%)
1	500101	0:11:39	727	0,5
2	500102	0:25:10	717	0,5
3	500103	0:01:42	709	0,5
4	500104	0:00:20	733	0,5
5	500105	0:09:01	709	0,5
6	500106	0:01:00	700	0,5
7	500107	0:03:14	697	0,5
8	500108	0:02:30	723	0,5
9	500109	0:00:35	704	0,5
10	500110	0:02:36	710	0,5

Таблица 8

Результаты счета тестовых задач (300 рейсов 30 ВС)

Номер теста	Имя теста	Время (ч:мм:сс)	$C_{\max}$	Макс. откл. (%)
1	300301	0:00:07	225	0,5
2	300302	0:47:18	170	2,5
3	300303	0:30:49	163	2,2
4	300304	0:28:44	172	2,4
5	300305	0:16:09	171	2,5
6	300306	0:12:29	166	0,5
7	300307	0:00:01	172	0,5
8	300308	0:08:00	160	0,5
9	300309	0:56:38	167	2,7
10	300310	0:37:36	174	1,7

5. Результаты тестирования модели программными средствами оптимизации расписаний

Результаты экспериментально доказывают перспективность внедрения разработанного инструментария для реальных авиакомпаний. Первая группа тестов (10 бортов, 500 рейсов) гарантирует отклонение от оптимума не более полупроцента значения критерия, что практически можно считать точным результатом. Время решения находится в интервале от 20 с до 25 мин 10 с. Десятиминутный интервал счета превышен для двух тестов из 10.

Вторая группа тестов (30 бортов, 300 рейсов) ожидаемо показала ухудшение гарантированной точности (в интервале от 0,5 до 2,7 % максимального отклонения от оптимума). Продолжительность решения находится в интервале от 1 с до 56 мин 38 с. Получасовой интервал превышен только для трех тестов из 10. В целом констатируем вполне обнадеживающие результаты исследований и разработок, относящихся к разряду фундаментальных, и перспективы их прикладного применения.

Заключение

Основными результатами явились разработка, программная реализация и сравнительный анализ свойств моделей и модификаций инструментальных средств поиска приближений к оптимальным решениям NP-трудной задачи составления расписаний системы несвязанных параллельных приборов с задержками начала обслуживания по критерию быстродействия. Экспериментально доказана практическая ценность результатов применительно к задаче оптимального оперативного регулирования назначений и графиков вылетов воздушных судов флота авиакомпании.

Результаты исследования программных реализаций алгоритмов на быстродействие и близость к оптимумам синтезируемых расписаний на тестах, соответствующих реальным размерностям реализаций задачи, позволяют сделать вывод о непосредственной применимости разработанного инструментария к потребностям практики.

Список литературы

1. Chiraphadhanakul V. Routing and Scheduling Models for Robust Allocation of Slack. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2010.
2. Teodorović D., Guberinić S. Optimal dispatching strategy on an airline network after a schedule perturbation // *European Journal of Operational Research*. 1984. P. 178–182.
3. Teodorović D., Stojković G. Model for Operational Daily Airline Scheduling // *Transportation Planning and Technology*. 1990. Vol. 14. P. 273–285.
4. Teodorović D., Stojković G. Model for operational daily airline scheduling // *Transportation Planning and Technology*. 1995. P. 273–285.
5. Jarrah A. I. Z., Yu G., Krishnamurthy N., Rakshit A. A Decision Support Framework for Airline Flight Cancellations and Delays // *Transportation Science*. 1993. Vol. 27, N. 3. P. 266–280.
6. Cao J. M., Kanafi A. Real-time decision support for integration of airline flight cancellations and delays. part I: Mathematical formulation // *Transportation Planning and Technology*. 1997. Vol. 20. P. 183–199.
7. Talluri K. T. Swapping Applications in a Daily Airline Fleet Assignment // *Transportation Science*. 1996. Vol. 30, N. 3. P. 237–248.
8. Yan S., Yang D.-H. A decision support framework for handling schedule Perturbation // *Transportation Research B*. 1996. Vol. 30, N. 6. P. 405–419.
9. Yan S., Tu Y. P. Multifleet Routing and Multistop Flight Scheduling for Schedule Perturbation // *European Journal of Operational Research*. 1996. Vol. 103. P. 155–169.
10. Lou S., Yu G. On the Airline Schedule Perturbation Problem Caused by the Ground Delay Program // *Transportation Science*. 1997. Vol. 31, N. 4. P. 298–311.
11. Arguello M. F., Bard J. F., Yu G. A GRASP for Aircraft Routing in Response to Grounding and Delays // *Journal of Combinatorial Optimization*. 1997. Vol. 5. P. 211–228.
12. Bard J. F., Yu G., Arguello M. F. Optimizing Aircraft Routings in Response to Groundings and Delays // *IEEE Transactions*. 2000. Vol. 33. P. 931–947.
13. Thengvall B. G., Bard J. F., Yu G. Balancing User Preferences for Aircraft Schedule Recovery During Irregular Operations // *IEEE Transactions*. 2000. Vol. 32. P. 181–193.
14. Rosenberger J. M., Johnson E. L., Nemhauser G. L. Re-routing Aircraft for Airline Recovery // *Transportation Science*. 2003. Vol. 37, N. 4. P. 408–421.
15. Andersson T., Varbrand P. The Flight Perturbation Problem // *Transportation Planning and Technology*. 2004 Vol. 27, N. 2. P. 91–118.
16. Eggenberg N., Salani M., Bierlaire M. Constraint-specific recovery network for solving airline recovery problems // *Computers and Operations Research*. 2010. Vol. 37. P. 1014–1026.
17. Jafari N., Zegordi S. H. Simultaneous recovery model for aircraft and passengers // *Journal of the Franklin Institute*. 2010. P. 20–22.
18. Bisailon S., Cordeau J.-F., Laporte G., Pasin F. A large neighborhood search heuristic for the aircraft and passenger recovery problem // *4OR—A Quarterly Journal of Operations Research*. 2011. Vol. 9, N. 2. P. 139–157.
19. Sinclair K., Cordeau J.-F., Laporte G. Improvements to a large neighborhood search heuristic for an integrated aircraft and passenger recovery problem // *European Journal of Operational Research*. 2014. Vol. 233, N. 1. P. 234–245.
20. Sinclair K., Cordeau J.-F., Laporte G. A column generation post-optimization heuristic for the integrated aircraft and passenger recovery problem // *Computers & Operations Research*. 2016. Vol. 65. P. 42–52.
21. Hu Y., Xu B., Gao M., Chi H. The study on the aircraft recovery with consideration of passenger transiting // *The Fifth International Conference on Management Science and Engineering Management*. 2011. P. 3–7. Macau, China: World Academic Press, World Academic Union.
22. Yang T., Hu Y. Considering Passenger Preferences in Integrated Postdisruption Recoveries of Aircraft and Passengers // *Research Article. Open Access Vol.* 2019. Article ID 9523610 <https://doi.org/10.1155/2019/9523610>
23. Mezentsev Y. A., Estraykh I. V. An optimal fleet assignment and flight scheduling problem for an airline company // 2018 CEUR Workshop Proceedings. № 2098. P. 277–290, EID: 2-s2.0-85048025360. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2098/paper24.pdf>
24. Lin Y. K., Hsieh H. T., Hsieh F. Y. Unrelated Parallel Machine Scheduling Problem Using an Ant Colony Optimization Approach // *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2012. Vol. 6. P. 1798–1803.
25. Lin Y. K. Particle Swarm Optimization Algorithm for Unrelated Parallel Machine Scheduling with Release Dates // *Mathematical Problems in Engineering*. Vol. 2013. Article ID 409486. 9 p.
26. Lee W. C., Wu C. C., Chen P. A simulated annealing approach to makespan minimization on identical parallel ma-

chines// International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2006. Vol. 31, N. 3—4. P. 328—334.

27. **Lenstra J. K., Shmoys D. B., Tardos E.** Approximation algorithms for scheduling unrelated parallel machines. Report OS-R8714, Centre for Mathematics and Computer Science, Amsterdam. 1987.

28. **Vazirani V.** Approximation Algorithms. Springer, 2001. 375 p.

29. **Kaabi J., Harrath Y.** A Survey of Parallel Machine Scheduling under Availability Constraints// International Journal of Computer and Information Technology. 2014. Vol. 03, Iss. 02. P. 238—245.

30. **Avdeenko T. V., Mezentsev Y. A., Estraiikh I. V.** Heuristic approach to unrelated parallel machines scheduling under availability and resource constraints// IFAC-Papers Online. 2017. Vol. 50, Iss. 1. P. 13096—13101.

31. **Mezentsev Y. A., Estraykh I. V., Chubko N. Y.** Implementation of an efficient parametric algorithm for optimal scheduling

on parallel machines with release dates // Journal of Physics: Conference Series № 1333 (2019) 022002. P. 1—7. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/2/022002.

32. **Mezentsev Y. A.** Binary Cut-and-Branch Method for Solving Linear Programming Problems with Boolean Variables // CEUR Workshop Proceedings. 2016. Vol. 1623. P. 72—85.

33. **Mezentsev Y.** Binary cut-and-branch method for solving mixed integer programming problems Constructive Nonsmooth Analysis and Related Topics (Dedicated to the Memory of V. F. Demyanov) // CNSA. 2017. URL:<https://doi.org/10.1109/cnsa.2017.7973989>

34. **Link** to tests and best solutions achieved. URL:<https://drive.google.com/drive/folders/16ez7NQd1cPPIymf0ALYnJzgzuGBXHga?ogsrc=32>

Yu. A. Mezentsev, Dr. Tech. Sc., Professor, e-mail: mesyan@yandex.ru,
Yu. L. Korotkova, Postgraduate Student, e-mail: juliapetrulina@yandex.ru,
I. V. Estraiikh, Senior Lecturer, e-mail: ive7@yandex.ru,
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

Problem and Tools for Optimal Regulation of Airline Fleet Schedules

The problem of optimal regulation of aircraft assignments for airline flights is considered. Optimal schedule management consists in setting or changing schedules in such a way that minimizes the increase in the total length of the schedule or the loss of the system from violations of the specified departure schedules of aircraft. This problem is NP-hard and does not have effective algorithms for exact solution. A detailed review of approaches to solving its modifications and related fleet management problems is given. The original formal formulation and solutions are presented. The article presents statistics on testing software implementations of modifications of its solution tools, proving the actual effectiveness of the developed tools.

Keywords: optimal regulation schedules, the criterion of performance, the binary cut and branch algorithm

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 19-37-90012; this work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russia, project no. FSUN-2020-0009.

DOI: 10.17587/it.26.450-459

References

1. **Chiraphadhanakul V.** Routing and Scheduling Models for Robust Allocation of Slack. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2010.

2. **Teodorović D., Guberinić S.** Optimal dispatching strategy on an airline network after a schedule perturbation, *European Journal of Operational Research*, 1984, pp. 178—182.

3. **Teodorović D., Stojković G.** Model for Operational Daily Airline Scheduling, *Transportation Planning and Technology*, 1990, vol. 14, pp. 273—285.

4. **Teodorović D., Stojković G.** Model for operational daily airline scheduling, *Transportation Planning and Technology*, 1995, pp. 273—285.

5. **Jarrah A. I. Z., Yu G., Krishnamurthy N., Rakshit A.** A Decision Support Framework for Airline Flight Cancellations and Delays, *Transportation Science*, 1993, vol. 27(3), pp. 266—280.

6. **Cao J. M., Kanafi A.** Real-time decision support for integration of airline flight cancellations and delays. part I: Mathematical formulation, *Transportation Planning and Technology*, 1997, vol. 20, pp. 183—199.

7. **Talluri K. T.** Swapping Applications in a Daily Airline Fleet Assignment, *Transportation Science*, 1996, vol. 30(3), pp. 237—248.

8. **Yan S., Yang D-H.** A decision support framework for handling schedule Perturbation, *Transportation Research B*, 1996, vol. 30(6), pp. 405—419.

9. **Yan S., Tu Y. P.** Multifleet Routing and Multistop Flight Scheduling for Schedule Perturbation, *European Journal of Operational Research*, 1996, vol. 103, pp. 155—169.

10. **Lou S., Yu G.** On the Airline Schedule Perturbation Problem Caused by the Ground Delay Program, *Transportation Science*, 1997, vol. 31(4), pp. 298—311.

11. **Arguello M. F., Bard J. F., Yu G.** A GRASP for Aircraft Routing in Response to Grounding and Delays, *Journal of Combinatorial Optimization*, 1997, vol. 5, pp. 211—228.

12. **Bard J. F., Yu G., Arguello M. F.** Optimizing Aircraft Routings in Response to Groundings and Delays, *IEEE Transactions*, 2000, vol. 33, pp. 931—947.

13. **Thengvall B. G., Bard J. F., Yu G.** Balancing User Preferences for Aircraft Schedule Recovery During Irregular Operations, *IEEE Transactions*, 2000, vol. 32, pp. 181—193.

14. **Rosenberger J. M., Johnson E. L., Nemhauser G. L.** Re-routing Aircraft for Airline Recovery, *Transportation Science*, 2003, vol. 37, no. 4, pp. 408—421.

15. **Andersson T., Varbrand P.** The Flight Perturbation Problem, *Transportation Planning and Technology*, 2004, vol. 27, no. 2, pp. 91—118.

16. Eggenberg N., Salani M., Bierlaire M. Constraint-specific recovery network for solving airline recovery problems, *Computers and Operations Research*, 2010, vol. 37, pp. 1014–1026.
17. Jafari N., Zegordi S. H. Simultaneous recovery model for aircraft and passengers, *Journal of the Franklin Institute*, 2010, pp. 20–22.
18. Bisailon S., Cordeau J.-F., Laporte G., Pasin F. A large neighbourhood search heuristic for the aircraft and passenger recovery problem, *4OR—A Quarterly Journal of Operations Research*, 2011, vol. 9, no. 2, pp. 139–157.
19. Sinclair K., Cordeau J.-F., Laporte G. Improvements to a large neighborhood search heuristic for an integrated aircraft and passenger recovery problem, *European Journal of Operational Research*, 2014, vol. 233, no. 1, pp. 234–245.
20. Sinclair K., Cordeau J.-F., Laporte G. A column generation post-optimization heuristic for the integrated aircraft and passenger recovery problem, *Computers & Operations Research*, 2016, vol. 65, pp. 42–52.
21. Hu Y., Xu B., Gao M., Chi H. The study on the aircraft recovery with consideration of passenger transiting, *The Fifth International Conference on Management Science and Engineering Management*, 2011, pp. 3–7, Macau, China: World Academic Press, World Academic Union.
22. Yang T., Hu Y. Considering Passenger Preferences in Integrated Postdisruption Recoveries of Aircraft and Passengers/ Research Article, Open Access, vol. 2019, Article ID 9523610, available at: <https://doi.org/10.1155/2019/9523610>
23. Mezentsev Y. A., Estraykh I. V. An optimal fleet assignment and flight scheduling problem for an airline company, *2018 CEUR Workshop Proceedings*, no. 2098, pp. 277–290, EID: 2-s2.0-85048025360, available at: <http://ceur-ws.org/Vol-2098/paper24.pdf>
24. Lin Y. K., Hsieh H. T., Hsieh F. Y. Unrelated Parallel Machine Scheduling Problem Using an Ant Colony Optimization Approach, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2012, vol. 6, pp. 1798–1803.
25. Lin Y. K. Particle Swarm Optimization Algorithm for Unrelated Parallel Machine Scheduling with Release Dates, *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2013, Article ID 409486, 9 p.
26. Lee W. C., Wu C. C., Chen P. A simulated annealing approach to makespan minimization on identical parallel machines, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, vol. 31, no. 3–4, pp. 328–334.
27. Lenstra J. K., Shmoys D. B., Tardos E. Approximation algorithms for scheduling unrelated parallel machines. Report OS-R8714, Centre for Mathematics and Computer Science, Amsterdam, 1987.
28. Vazirani V. Approximation Algorithms, Springer, 2001, 375 p.
29. Kaabi J., Harrath Y. A Survey of Parallel Machine Scheduling under Availability Constraints, *International Journal of Computer and Information Technology*, 2014, vol. 03, iss. 02, pp. 238–245.
30. Avdeenko T. V., Mezentsev Y. A., Estraykh I. V. Heuristic approach to unrelated parallel machines scheduling under availability and resource constraints, *IFAC-Papers Online*, 2017, vol. 50, iss. 1, pp. 13096–13101.
31. Mezentsev Y. A., Estraykh I. V., Chubko N. Y. Implementation of an efficient parametric algorithm for optimal scheduling on parallel machines with release dates, *Journal of Physics: Conference Series № 1333*, 2019, 022002, p. 1–7, DOI: 10.1088/1742-6596/1333/2/022002
32. Mezentsev Y. A. Binary Cut-and-Branch Method for Solving Linear Programming Problems with Boolean Variables, *CEUR Workshop Proceedings*, 2016, vol. 1623, pp. 72–85.
33. Mezentsev Y. Binary cut-and-branch method for solving mixed integer programming problems Constructive Nonsmooth Analysis and Related Topics (Dedicated to the Memory of V. F. Demyanov), *CNSA 2017*, available at: <https://doi.org/10.1109/cnsa.2017.7973989>
34. Link to tests and best solutions achieved, available at: <https://drive.google.com/drive/folders/16ez7NQd1cPPIymf0ALYnJgzqzGBXhGa?ogsrc=32>

20—22 октября 2020 года в Москве состоится

Третья Международная научно-техническая конференция «СОВРЕМЕННЫЕ СЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» (MoNeTec- 2020)

Председатель программного комитета:

Р. Л. Смелянский, чл.-корр. РАН, профессор, МГУ им. М. В. Ломоносов

Основные темы конференции

- Архитектура и протоколы для автоматизации управления сетями и оркестрации в облачных инфраструктурах
- Инновационные технологии для облаков, интернета, компьютерных сетей
- Новые парадигмы в организации и функционирования сетей, например, Intent Based Network, Information Centric Network, Content Centric Network т.п.
- Подходы, методы и средства для управления качеством сервиса и распределения ресурсов в сетях и облачных средах
- Применение больших данных и машинного обучения для повышения эффективности функционирования сетей, облачных платформ и управления ими
- Проблемы безопасности сетей и облачных платформ
- Применение сетевых облачных технологий к обработке больших данных, Интернета вещей, сетей беспроводной и мобильной связи
- Вопросы архитектуры программно-управляемого телекоммуникационного оборудования

Подробная информация о конференции, размещена на официальном сайте
<http://www.monetec.ru>

А. Н. Родионов, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., ran@newmail.ru,
Вычислительный центр ДВО РАН, г. Хабаровск

Концептуальное и логическое моделирование данных: обнаружение и конфигурирование R -типов и n -арных отношений в предметных областях

Решаются задачи обнаружения и конфигурирования комплексов высокоуровневых отношений баз данных (отношений с арностью 3 и выше) и представления части последних посредством R -типов. R -тип — одна из категорий синтетических объектных типов, экземпляры которых ассоциируются с отношениями, возникающими между объектами. Такие объекты-отношения обладают собственными свойствами и в состоянии вступать во взаимодействие с другими объектами. Показано, что многозначные функциональные зависимости, которые могут присутствовать среди атрибутов внешних ключей заголовочных документальных типов, однозначно идентифицируют и сами n -арные отношения, и соответствующие им R -типы. Вводится понятие комплекса бинарных n -арных отношений-типов, которые объединяет наличие общих исходных взаимодействующих типов. На основе предлагаемой p/a -характеристики бинарных отношений разрабатывается метод установления первичных (подлежащих хранению) и производных (выводимых) их первичных отношений, образующих комплекс.

Ключевые слова: высокоуровневые отношения, R -типы, p/a -характеристика, многозначные функциональные зависимости

Введение

Выявление типов бинарных отношений, в которых могут состоять, будут состоять и состоят объекты предметных областей, — тривиальная, рутинная процедура концептуального и логического моделирования данных. Проблемы моделирования возникают, когда в отношения оказываются вовлеченными одновременно более двух объектов. (На отношения с арностью 3 и выше будем ссылаться далее как на n -арные (высокоуровневые) отношения, где n — степень отношения.) Перечислим и раскроем суть каждой из проблем.

В первую очередь, n -арные отношения должны быть обнаружены в предметной области или, если это приемлемо, логически выведены из уже ранее установленных бинарных отношений. Существующие технологии и отдельные методы концептуального моделирования в состоянии описать структуру и ограничения кардинальности отношений произвольной арности [1–3], но не включают методы идентификации последних.

Вторая проблема — проблема аномальности обновлений высокоуровневых отношений —

достаточно хорошо изучена. Специально разработанная и непрерывно совершенствующаяся теория нормальных форм [4–8] нацелена на поиск и исключение аномалий в предварительно полученных отношениях, но ограничивается зачастую формальными аспектами, делая акцент на достоверность и постоянство имеющейся в распоряжении аналитиков семантики, что не всегда соответствует действительности. Семантика отношений, которая выражается в форматах функциональных зависимостей и кардинальности связей, иногда бывает подвержена изменениям, а это, в свою очередь, требует получения таких моделирующих конструкций, которые были бы нечувствительны к этим изменениям. Для обеспечения устойчивости логических схем было предложено несколько решений — от использования различных систем классификации отношений [9–12] до специально разработанных шаблонов [3, 10, 11], "предвосхищающих" потенциальные изменения.

Отношения между отношениями составляют суть следующей актуальной проблемы моделирования данных. Показательна работа [13], в которой можно найти несколько специализированных паттернов моделирования, по-

звolyающих представить подобные отношения на концептуальном уровне. Правда, при этом не указываются и не унифицируются формальные условия, приводящие к этим паттернам.

Отправной точкой для решения всех перечисленных задач может стать обнаружение и (или) вывод n -арных отношений из бинарных отношений. Некоторые из высокоуровневых отношений находятся достаточно просто. В предметных областях присутствует специфический класс высокоуровневых отношений, экземпляры которого естественным образом воспринимаются в качестве объектных типов. Некоторые из таких типов у всех "на слуху". Например, спортивные матчи — ассоциации между двумя командами, бухгалтерские проводки, связывающие два счета, смс-сообщения, включающие источники и приемники сообщений. Список может продолжен.

Одной из первых работ, в которой n -арные отношения трактовались как сущности, была работа [14]. В современных технологиях моделирования подобные отношения называются по-разному. Например, в ORM они именуются как "objectified associations" [13], а в Onto UML — как "relators" [15]. Из соображения лаконичности будем пользоваться последней нотацией.

Формально *relator* (R -тип, рилейтор) — это "слабая сущность", каждый экземпляр которой идентифицируется составным суррогатным ключом (рис. 1).

Как видно из схемы (рис. 1), ассоциация с кардинальностью $M:M$ может иметь две альтернативные формы представления: либо в виде "слабой сущности" (W -типа) с составным суррогатным ключом $\langle Id_1^*, Id_2^* \rangle$, либо в виде "relator" с единственным ключевым суррогатным атрибутом Id_r^* . В последнем случае уникальность пары $\langle Id_1, Id_2 \rangle$ в составе R -типа становится обязательным ограничением целостности. (Надстрочный индекс, которому на рис. 1 присвоен символ "*", указывает на ключевой атрибут.)

Поскольку R -типы и W -типы — две альтернативные формы представления высокоуровневых ассоциаций, то идентификация R -типа будет автоматически приводить к обнаружению искомой ассоциации.

Альтернативный, дополняющий подход к обнаружению n -арных отношений может строиться на основе анализа грамматических конструкций естественных языков [9, 12, 16—18], в частности, их глагольных форм. В статье также используются модальные и немодальные формы глаголов для классификации высокоуровневых отношений в целях локализации исходных и производных классов отношений.

Настоящая работа нацелена на решение нескольких тесно связанных друг с другом задач, среди которых: обнаружение и конфигурирование отношений с арностью 3 и выше; установление признаков, на основании которых n -арные отношения должны быть приведены к объектным типам (R -типам); разработка рамочной основы для построения, по возможности, полной и устойчивой системы отношений в моделируемой предметной области.

Статья организована следующим образом. В первой части приводятся задействованные в работе понятия и нотации, рассматривается "природа" R -типов и излагается процедура идентификации последних, одновременно приводящая к идентификации и n -арных отношений. Формальные схемы отношений, приводящие к получению 3-компонентных рилейторов, и возникающие при этом неопределенности исследуются во второй части статьи. В третьем разделе работы на примере конфигурирования 4-компонентных отношений раскрывается суть и значимость p/a характеристики бинарных связей между объектами для построения полной системы отношений. В четвертой части статьи рассматривается один из вариантов подсхем организации данных, увязывающий R -типы с подтипами сущностных типов, образующих кластер.

1. Используемая нотация и процедура идентификации простейших рилейторных типов

Претендентами на рилейторы, если исходить из изложенного выше, могут быть только слабые сущности. Рассмотрим формальные ассоциации, которые могут возникать между типами в моделях данных, и выделим те из них, которые могут приводить к появлению R -типов.

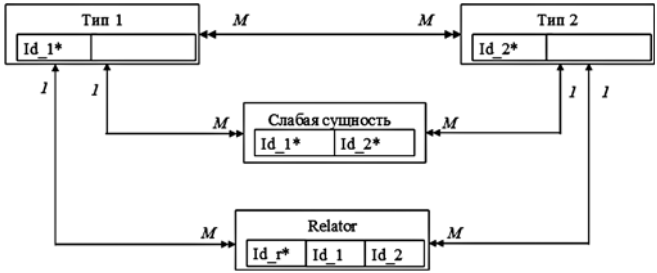


Рис. 1. Источники и структура R -типа

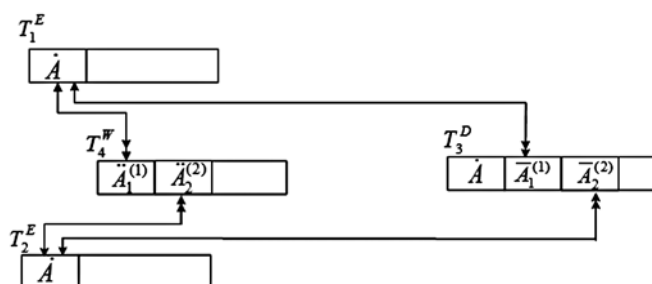


Рис. 2. Виды ассоциаций между типами и используемая нотация

Но прежде всего, определимся с терминами, обозначениями и моделирующими конструкциями, которыми далее будем пользоваться.

Среди множества типов, входящих в состав баз данных, будем различать сущностные типы, документальные заголовочные типы и слабые сущности. (Документальный заголовочный тип — обязательный корневой тип документального кластера, атрибуты которого, согласно работе [19], соотносятся с однозначными реквизитами моделируемого документа.) В качестве базовой моделирующей конструкции остановимся на диаграмме базы данных (рис. 2), которую, в отличие от концептуальной и логической схем, несущих схожую функцию, отличает полный набор элементов, достаточных и для представления объектов и отношений реального мира, и для однозначного преобразования последних в физические структуры хранения.

Будем также полагать, что, по умолчанию, каждый тип — это одновременно и переменная отношения в реляционной модели, в которой для задания типа достаточно перечислить имена атрибутов, входящих в его состав, и области определения (домены) этих атрибутов. (Ссылки на домены как несущественные для задач, которые решаются в работе, далее будем опускать, ограничившись только перечнями атрибутов.) Соответственно реализации типа — не что иное, как тело отношения (или просто отношение), представленное совокупностью кортежей.

В обозначении типов, позволяющих их однозначно идентифицировать в диаграмме базы данных, будем придерживаться следующей символики. Пусть $T_n^{Z_m}$ ссылается на некоторый тип. Верхний индекс Z , там, где это требуется в работе, принимает одно из трех значений: E — сущностный тип (E -тип), D — документальный тип (D -тип), W — слабая сущность (W -тип), R — релейтер (R -тип). Нижний индекс n — порядковый номер этого типа. В некоторых примерах n заменяется на название типа. Еще один индекс — m в Z_m указывает категорию сущностного типа: *Prototype*, *Sample* или *Instance*.

Согласно работе [20] в базах данных экземпляры сущностных типов могут нести различную функциональную нагрузку, что выражается в их соответствующей функциональной дифференциации. Экземпляры *Prototype*-типов — это прообразы, модели сущностей. В свою очередь, экземпляры реальных сущностей распределяются среди *Sample*- и *Instance*-типов. Основное различие между экземплярами *Sample*- и *Instance*-типов — принятый в конкретной предметной области способ учета этих экземпляров. *Instance* образован единичными экземплярами, каждый из которых ассоциируется с конкретной сущностью. В отличие от *Instance*-экземпляров, экземпляры *Sample*-типов ссылаются одновременно на несколько конкретных сущностей, характеризующихся одинаковыми значениями их подлинных свойств. Согласно последней особенности *Sample*-тип должен включать обязательный количественный атрибут.

Сущностные категории *Prototype*, *Sample* и *Instance* связаны друг с другом предопределенными отношениями и совместно образуют сущностный кластер (рис. 3).

В тексте статьи ссылки на ассоциации, связывающие типы, даются в виде: $T_i \leftrightarrow T_j$ — связь с кардинальностью 1:1, $T_i \longleftrightarrow T_j$ — связь с кардинальностью 1:M, $T_i \longleftrightarrow T_j$ — связь с кардинальностью M:M.

Отношения между типами представим в виде отношений между атрибутами простых первичных ключей $\bar{A}$, атрибутами составных первичных ключей $\bar{A}$ и атрибутами внешних ключей $\bar{A}$. За каждым конкретным атрибутом "скрывается" множество, образованное значениями, принимаемыми этим атрибутом. Привяжем атрибуты к типам с помощью индексов. В итоге обозначение атрибута примет следующий вид: $A_m^{n(n)}$.

Принадлежность атрибута конкретному (собственному) типу отражена посредством

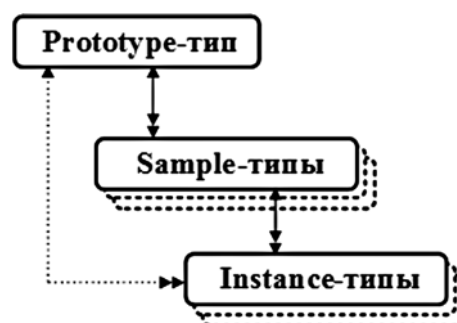


Рис. 3. Конфигурация унифицированного сущностного кластера

первого компонента верхнего индекса. Другой компонент верхнего индекса (заключенный в круглые скобки) указывает на родительский тип и, по очевидной причине, используется только для $\dot{A}$ - и $\ddot{A}$ -атрибутов. Порядковые номера атрибутов внешнего и составного первичного ключей в типе задаются с помощью нижнего индекса m .

Опишем области определения перечисленных разновидностей ключевых атрибутов. Условимся, что в целом соответствует повседневной практике, что для любого $\dot{A}$ справедливо: $\dot{A} \subset \mathbb{Z}$. Другими словами, $\dot{A}$ в нашем случае — это всегда суррогатный ключ.

Для атрибутов внешних ключей, а также отдельных атрибутов, входящих в состав составных ключей, действуют следующие ограничения:

$$\bar{A}_m^{n(n)} \subseteq \dot{A}^n; \tag{1}$$

$$\ddot{A}_m^{n(k \neq n)} \subseteq \dot{A}^{k \neq n}. \tag{2}$$

Первое ограничение (1) определяет множество значений, которые может принимать $\bar{A}_m^{n(n)}$. При этом ссылки на собственный и родительский типы $n(n)$, ввиду допустимости рекурсий в сущностных типах, могут совпадать.

Для атрибутов составных первичных ключей, входящих в состав слабых сущностей, их области определения также формируются на основании множества значений, принимаемых первичными ключами сущностных типов. Форма записи ограничения (2) для $\ddot{A}$ несколько отличается от ограничения (1). Запись $k \neq n$ в обозначении верхнего индекса свидетельствует о недопустимости присутствия рекурсий в W -типах.

По определению, составной первичный ключ (СПК), который, в том числе, является отличительным признаком W -типа, образован несколькими упорядоченными атрибутами. Область его значений $\dot{A}$ — ни что иное, как подмножество множества упорядоченных кортежей, являющихся результатом декартова произведения определенной совокупности $\bar{A}$ -множеств. В общем виде:

$$\ddot{A}^n \subseteq \dot{A}_1^{k \neq n} \times \dots \times \dot{A}_M^{k \neq n} = \{ \langle a_1, \dots, a_m, \dots, a_M \rangle \}, \tag{3}$$

где M — степень составного первичного ключа, $M \geq 2$; $\dot{A}_m^{k \neq n}$ — первичный ключ k -го сущностного типа; a_m — значение m -го атрибута СПК.

Основная особенность ассоциаций, возникающих между сущностными и документальными типами, показанными на рис. 2, заключается в том, что тело отношения, соответ-

ствующее T_3^D , может определяться не только на основании соотношения (1).

Пусть $\bar{A}^n$, по аналогии с СПК, — составной внешний ключ (СВК), который так же, как и СПК, представляет собой подмножество множества упорядоченных кортежей и определяется согласно соотношению (3). Предположим, что в формировании $\bar{A}^n$ участвуют те же самые атрибуты, что образуют СПК некоторой слабой сущности T^W . В предметных областях нередки ситуации, когда СПК и СВК связаны друг с другом соотношением:

$$\bar{A}^n \subseteq \ddot{A}^{(k \neq n)}. \tag{4}$$

Записанное ограничение иллюстрируется примерами (рис. 4). Из отношения, соответствующего T_3^D , вычеркнуты кортежи, которых нет в T_4^W .

Действие ограничения (4) ведет к появлению аномалий вставки и модификации кортежей в T_3^D . Действительно, чтобы добавить новый кортеж в T_3^D , потребуется первоначально проверить наличие аналогичного кортежа в T_4^W . В свою очередь, удаление кортежа в T_4^W должно сопровождаться удалением группы кортежей в T_3^D , содержащих те же значения упорядоченных атрибутов внешних ключей, что и значения ключевых атрибутов в удаляемом кортеже T_4^W .

Исключить указанные аномалии можно, преобразовав исходную схему (см. рис. 2). В представленном варианте (рис. 5) "слабая сущность" (рис. 5, б) заменена на рилейторный тип (рис. 5, в), а вместо связей $T_1^E \longleftrightarrow T_3^D$ и $T_2^E \longleftrightarrow T_3^D$ задействована связь $T^R \longleftrightarrow T_3^D$.

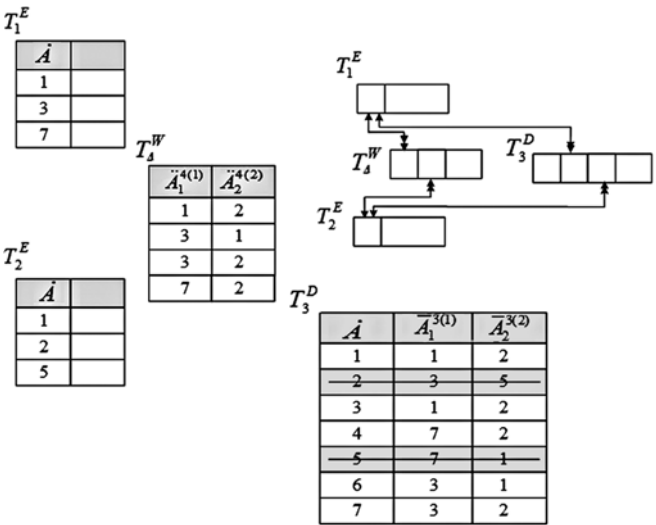


Рис. 4. Ассоциации между типами, которые могут приводить к появлению R -типа

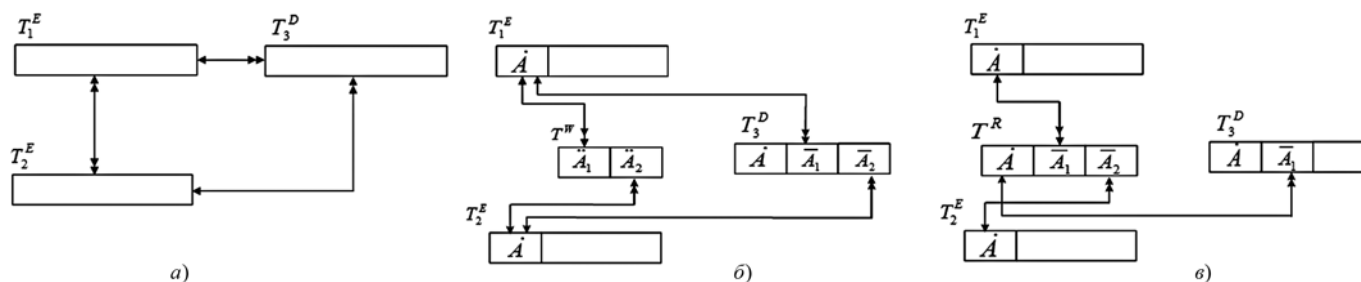


Рис. 5. Замена W -типа на R -тип

Основываясь на вышесказанном, сформируем первое из двух условий появления R -типов в базах данных.

Заметим, что атрибуты внешних ключей T_3^D связаны друг с другом многозначной функциональной зависимостью. Отсюда следует, что если между произвольными атрибутами внешних ключей некоторого заголовочного документального типа обнаружена многозначная функциональная зависимость, то в схеме организации данных должен присутствовать W -тип, который следует преобразовать в R -тип с последующей заменой пары атрибутов внешних ключей исходного документального типа на атрибут внешнего ключа, наследуемого от первичного ключа R -типа.

Нетрудно оттолкнуться и от обратного. Если какие-либо два типа связаны друг с другом ассоциацией, кардинальность которой $M:M$, и эти же типы одновременно ссылаются на третий тип и кардинальность этих связей составляет $1:M$ или $1:1$ ($1:1$ здесь трактуется как частный случай $1:M$), то W -тип должен быть заменен на R -тип для исключения многозначной функциональной зависимости между наследуемыми внешними ключами третьего типа.

Второе условие, которое должно выполняться, чтобы состоялась замена W -типа на R -тип, предполагает идентичность всех ролевых подмножеств, участвующих во взаимодействиях между сущностными типами и между сущ-

ностными и документальным типом. Поясним сказанное на примере той же самой формальной подсхемы, изображенной на рис. 5, снабдив ее некоторой семантикой (рис. 6), которая указывает на содержание сущностных типов и состав ролевых, взаимодействующих множеств, являющихся определенными подмножествами сущностных типов.

В двух взаимодействиях между типами "Личности" и "Подразделения" разрешено участвовать разным подмножествам "Личностей". В одном случае — это будут "Студенты", в другом — "Преподаватели". В то же время, домен атрибута $\bar{A}_1$ ($\bar{A}_1$ — внешний ключ T_3^D), — это "Преподаватели". Поэтому только один из W -типов, "связывающий" типы "Личности" и "Подразделения" с соответствующими ролями "Преподаватели" и "Кафедры", может быть преобразован в R -тип.

Способы задания ролевых подмножеств подробно описаны в работе [21] и поэтому в данной статье не рассматриваются.

2. Многокомпонентные релейторы

Только что рассмотренный случай, приводящий к появлению R -типов, можно считать одновременно и показательным, и простым, потому что R -тип синтезирован из отношения, в котором одновременно "участвуют" только два типа и "слабая сущность" обнаруживает-

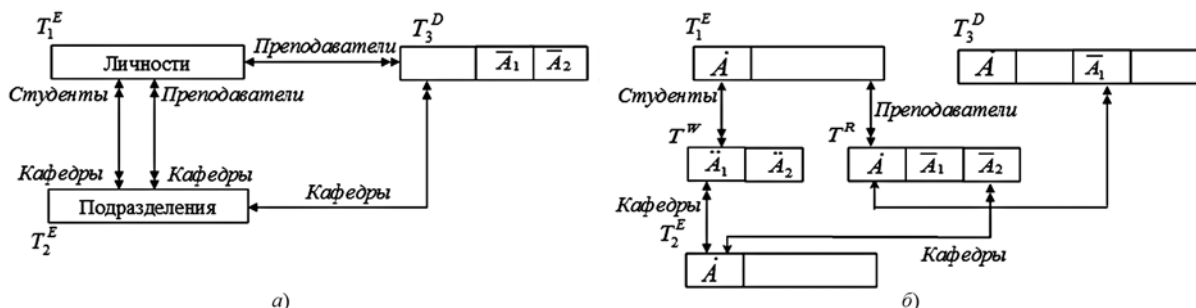


Рис. 6. Замена W -типа на R -тип с учетом семантики связей

ся достаточно просто — как необходимость в представлении ассоциации $M:M$ в качестве самостоятельного типа. Но в орбиту R -типов могут оказаться вовлечены и другие типы, непосредственно соприкасающиеся с источниками R -типов. Установим признаки, на основании которых атрибутивный состав релейторов подлежит расширению.

Добавим в анализируемую конструкцию (см. рис. 2) еще один тип T_5 и исследуем влияние ассоциаций, связывающих T_1 , T_2 и T_5 , и кардинальность этих ассоциаций на необходимость ввода релейторного типа и его атрибутивный состав. По-прежнему T_1 , T_2 и T_5 ссылаются на документальный тип T_3 .

Несколько упростим систему обозначений ключевых атрибутов, пометая их буквами английского алфавита и латинскими цифрами, и откажемся от индексов, которые несущественны для содержимого текущего раздела.

Для перечисленных на рис. 7 сочетаний сущностных типов только две комбинации влекут за собой появление R -типов. В первом случае (рис. 7, *а*) R -тип — следствие ассоциации с кардинальностью $M:M$ между T_1 и T_2 .

Во втором (рис. 7, *б*) причиной его возникновения является наличие двух функциональных зависимостей: $\overline{II}^{1(2)} = f_1(I)$ и $\overline{II}^{5(2)} = f_2(III)$, а также очевидное ограничение, в соответствии с которым для каждого кортежа отношения с заголовком $R\{\overline{R}, \overline{I}, \overline{III}\}$ должно выполняться условие $f_1(I) = f_2(III)$. Заметим, что в последнем случае R -тип никак не связан с $M:M$ -ассоциацией. Таким образом, имеет место комбинация функциональных зависимостей между атрибутами внешних ключей документальных типов, которая также приводит к необходимости формирования R -типов.

Показанный на рис. 8 пример отношений, соответствующих подсхеме на рис. 7, *в*, иллюстрирует описанную ситуацию. Кортежи t_3 и t_4 , которые ввиду действия представленного ограничения не могут присутствовать в отношении D ,

вычеркнуты из последнего. На другой части рисунка показано то же самое отношение D , содержащее атрибут внешнего ключа, ссылающегося уже на R -тип.

Две другие подсхемы (рис. 7, *а* и рис. 7, *б*) не влекут за собой появление R -типов.

Следующие схемы (рис. 9) включают в себя обязательную ассоциацию с кардинальностью $M:M$ между T_1 и T_2 и дополнительные ассоциации с кардинальностями $1:M$ противоположной направленности между T_2 и T_5 . Показа-

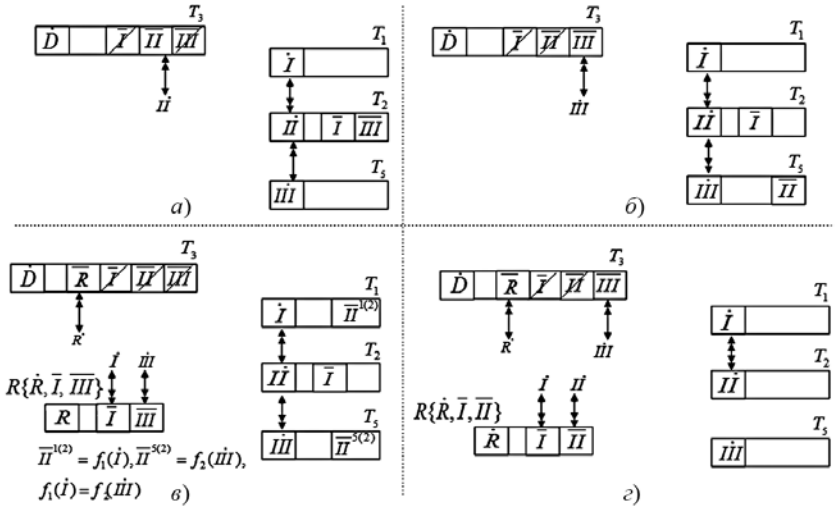


Рис. 7. Простейшие ассоциации, приводящие к R -типам

T_3	$\overline{D}$	$\overline{I}$	$\overline{II}$	$\overline{III}$
t_1		A1	B1	C4
t_2		A1	B1	C5
t_3		A1	B3	C1
t_4		A2	B5	C4

T_3	$\overline{D}$	$\overline{R}$
t_1		1
t_2		2

T_1	$\overline{I}$	$\overline{II}$
A1	B1	
A2	B5	

T_2	$\overline{II}$
B1	
B2	
B3	

T_5	$\overline{III}$	$\overline{II}$
C1	B3	
C4	B1	
C5	B1	

$R\{\overline{R}, \overline{I}, \overline{III}\}$	$\overline{R}$	$\overline{I}$	$\overline{III}$
1	A1	C4	
2	A1	C5	

Рис. 8. Состав и содержание R -типа при отсутствии многозначных функциональных зависимостей

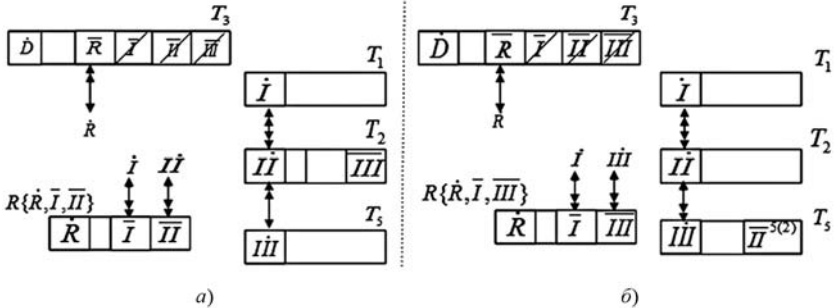


Рис. 9. Атрибутивный состав и ограничения R -типов при наличии $M:M$ -ассоциаций

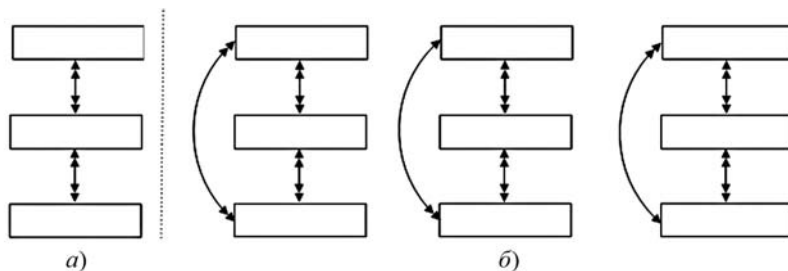


Рис. 10. Варианты концептуальных схем с множественными $M:M$ -ассоциациями

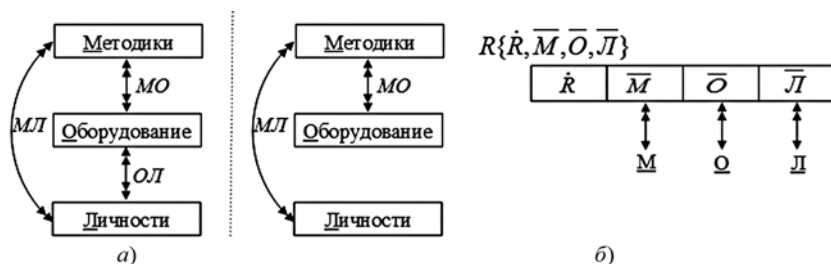


Рис. 11. Фрагмент концептуальной модели предметной области "Проверка средств измерений"

Методики
M1
M2

M	O
M1	O1
M2	O1
M2	O2

Оборудование
O1
O2

Личности
Л1
Л2
Л3

M	Л
M1	Л1
M1	Л3
M2	Л2

$OL=MO\bowtie ML$			
	M	O	Л
t_1	M1	O1	Л1
t_2	M1	O1	Л3
t_3	M2	O1	Л2
t_4	M2	O2	Л2

Рис. 12. Фрагмент выводимых отношений логической модели

тельна конструкция на рис. 9, б, в которой значение внешнего ключа $\overline{II}$ T_3 -типа может быть найдено на основании функциональной зависимости $\overline{II}^{5(2)} = f(III)$. Заметим, что нулевые или пустые значения атрибута $\overline{II}^{5(2)}$, если таковые допускаются, делают текущую конфигурацию R -типа некорректной и предполагают переход к схеме $R\{\dot{R}, \overline{I}, \overline{II}\}$ с отменой запрета на присутствие $\overline{III}$ в T_3 . При этом вступает в силу ограничение $\overline{III}^3 = f(\dot{R}^3)$.

Алгоритм идентификации R -типов для схем, содержащих две и более ассоциации с кардинальностями $M:M$ (рис. 9), не столь очевиден и однозначен. Он требует, помимо учета рассматриваемых структурных конфигураций (формальных по своей сути), отслеживания и ряда семантических аспектов взаимодействий. Но прежде чем перейти

к обоснованию и изложению такого алгоритма, поставим вопрос о возможной эквивалентности двух подходов, изображенных на рис. 10, а и б. Возьмем в качестве примера объекты и ассоциации, присутствующие в области проверки средств измерений и связывающие друг с другом такие типы сущностей, как "Методики", "Оборудование" и "Личности".

Соответствующий бизнес-процесс, содержащий перечисленные объекты и отношения между ними, представим в виде сценария.

Сценарий. "Организация выполняет проверку приборов, используя для этого специализированное оборудование. Одни те же методики проверки могут поддерживаться разными видами оборудования и наоборот. Личности, допущенные к проверке приборов на конкретных видах оборудования, должны владеть соответствующими методиками. По результатам проверки заказчику выдается свидетельство о проверке, в заголовке которого указывается вид оборудования, методика проверки и персона, проводившая проверку".

Концептуальная схема, содержащая объекты и отношения в представленной предметной области, может быть организована двояким образом (рис. 11).

Покажем, что отношение $OL-OL$ {Оборудование, Личность} — выводимо из отношений MO {Методики, Личность} и LO . Действительно, ссылаясь на то, что приборы могут быть проверены только личностями, владеющими определенными методиками, приводит к тому, что $OL = MO \bowtie ML$ (рис. 12). Отсюда, в частности, следует, что R -тип — $R\{\dot{R}, \overline{M}, \overline{O}, \overline{L}\}$, как и подобная ему слабая сущность, являются лишними в логической модели, так как дублируют данные двух других W -типов: MO и ML .

Несмотря на это, подсхема, присутствующая на рис. 11, а, также имеет право на существование. Достаточно снять ограничение, согласно которому "Личности, допущенные к проверке на конкретных видах оборудования, должны владеть соответствующими методиками." Тогда отношение OL не может рассматриваться как результат естественного соединения MO и ML .

3. Процедура конфигурирования комплексов n -арных отношений и R -типов

Выдвинем гипотезу, согласно которой любое отношение с арностью 3 и выше является подмножеством отношения, полученного в результате естественного соединения ряда бинарных отношений. Под комплексом (комплексом) отношений будем понимать совокупность исходных бинарных отношений, участвующих в синтезе 3- и более арных отношений.

Из содержимого предыдущего раздела следует, что кроме семантики еще и невыводимость некоторых отношений задают потребность в построении 3-арных отношений. Между тем, имеется еще несколько факторов, которые также следует учитывать, когда принимается решение о конфигурировании высокоуровневых отношений. Далее, на конкретном примере (рис. 13), приводящем к конфигурированию 3- и 4-арных отношений, рассмотрим полный спектр вопросов, которые могут возникнуть в процессе построения отношений с арностью 3 и выше.

Пусть исходный набор отношений образован слабыми сущностями, устанавливающими следующие бинарные факты-отношения:

- $ГД^A$ — список дисциплин, изучаемых студентами в составе учебной группы;
- $ДЗ^P$ — виды занятий, предусмотренные дисциплиной;

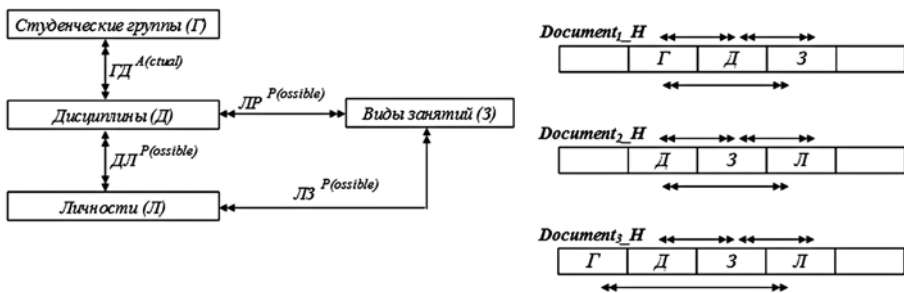


Рис. 13. Типы и ассоциации, участвующие в синтезе высокоуровневых отношений

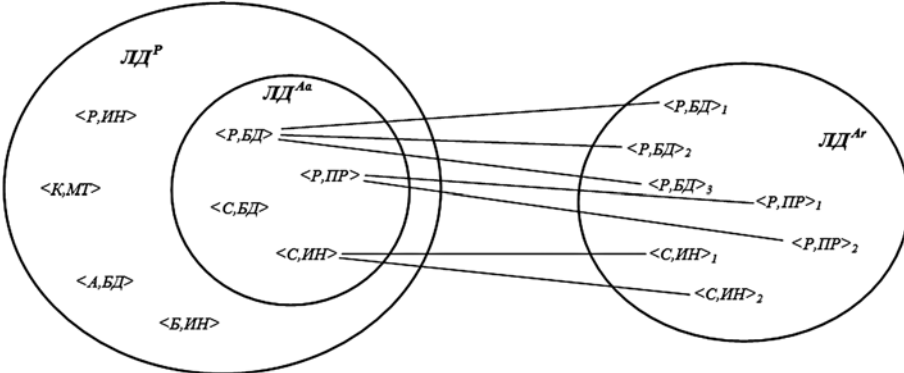


Рис. 14. Отношения между множествами потенциальных, разрешенных и состоявшихся фактов

$ЛД^P$ — преподаватели, которые могут вести те или иные дисциплины;
 $ЛЗ^P$ — виды занятий, которые могут проводить преподаватели.

(Так как в данном конкретном случае в расчет принимается семантика отношений, то удобно отдельные кортежи отношений интерпретировать в качестве фактов.)

Среди перечисленных групп (типов) фактов неявно можно выделить факты по меньшей мере двух разных форматов: "потенциальные" (*Potential*) — P -факты и фактические (*Actual*) — A -факты. Если первые указывают на возможность существования отношений определенного типа, то вторые — это уже реальные факты, являющиеся подмножествами первых: $F_j^A \subseteq F_j^P$. Здесь F_j^A и F_j^P — множества соответственно фактических и потенциальных фактов j -го вида.

Если подходить к указанным различиям в форматах фактов более строго, то среди F_j^A можно обнаружить подмножества двух видов: F_j^{Aa} и F_j^{Ar} , экземпляры которых связаны друг с другом функциональной зависимостью $F_j^{Aa} = f(F_j^{Ar})$. Элементы состоявшихся взаимодействий образуют подмножество F_j^{Ar} , элементы разрешенных взаимодействий — подмножество F_j^{Aa} .

Например, применительно к отношению $ЛД$ элементы $ЛД^P$ будут включать пары "личность—дисциплины", показывающие, какие дисциплины может вести преподаватель. (В работе мы не рассматриваем процедуры, приводящие к возникновению этих отношений, несмотря на то, что такая задача существует.) Дисциплины, которые будет проводить преподаватель, составят $ЛД^{Aa}$. Факты, касающиеся дисциплин, которые ведет в настоящее время преподаватель или уже провел, будут зафиксированы в $ЛД^{Ar}$. Поэтому между $ЛД^{Aa}$ и $ЛД^{Ar}$ установится взаимно однозначное соответствие — $ЛД^{Aa} = f(ЛД^{Ar})$. Очевидно, что и $ЛД^{Aa} \subseteq ЛД^P$.
 Для наглядности элементы упомянутых множеств и отношения между множествами показаны на рис. 14.

Далее, чтобы сосредоточиться только на вопросах

конфигурирования n -арных отношений, не будем проводить различий между $F_j^{A_a}$ и $F_j^{A_r}$, полагая, что $F_j^{A_a} = F_j^{A_r}$. (Конфигурирование $F_j^{A_r}$ автоматически влечет за собой учет фактора времени. Например, в контексте $ДЗ^A$ это будет означать, что преподаватель, скорее всего, не ограничится одним занятием по одной дисциплине.)

Определимся с необходимостью поддержки 3- и 4-арных отношений, воспользовавшись в качестве маркеров таких отношений документальными типами.

Пусть имеются документы: $Document_1$, $Document_2$ и $Document_3$, часть атрибутов заголовочных структур которых ссылаются на объектные типы (см. рис. 13). Между атрибутами соответствующих внешних ключей, обозначенных как $Г$, $Д$, $З$ и $Л$, присутствуют многозначные функциональные зависимости, которые предполагают синтез рилейтерных типов: $ГДЗ$, $ДЗЛ$ и $ГДЗЛ$.

$ГДЗ$ может быть получен в результате естественного соединения $ГД$ и $ДЗ$: $ГДЗ = ГД \bowtie ДЗ$. В свою очередь, $ДЗЛ$ определен как: $ДЗЛ = ДЗ \bowtie ДЛ \bowtie ЛЗ$. Возникает вопрос, а к каким форматам (P или A) следует отнести полученные отношения? Исходный набор бинарных отношений, что очевидно, может состоять или только из P -отношений, или A -отношений, или их комбинации.

Понятно, что если все исходные отношения относятся к P -формату, то и результирующее отношение также будет P -отношением.

Для остальных двух комбинаций сделать столь однозначное заключение, не прибегая к специальному анализу результирующих отношений, будет затруднительно. Покажем, почему это так. Воспользовавшись тем же самым примером, сконфигурируем два варианта $ГДЗ$:

$$\begin{aligned} ГДЗ^I &= ГД^A \bowtie ДЗ^A \text{ и} \\ ГДЗ^{II} &= ГД^A \bowtie ДЗ^P. \end{aligned}$$

Если исходить из того, что $ДЗ^A \subseteq ДЗ^P$, то $M(ДЗ^P) \geq M(ДЗ^A)$, где M — мощность отношения. Отсюда следует, что по мощности $ГДЗ^{II}$ будет всегда сопоставимо или превышать $ГДЗ^I$, $M(ГДЗ^I) \geq M(ГДЗ^{II})$. На этом основании $ГДЗ^{II}$ не может быть отнесено к A -формату. Следовательно, наличие хотя бы одного P -отношения в исходном бинарном наборе делает результирующее отношение P -отношением.

В отличие от $ГДЗ^{II}$ $ГДЗ^I$ может быть присвоен как A , так и P -формат, потому что может оказаться, что и $ГД^A = ГД^P$ и (или) $ДЗ^A = ДЗ^P$.

Предположим, что $ГДЗ^A = ГДЗ^I$. Но $ГДЗ^I$ по определению не является исходным, первичным отношением. Следовательно, могут существовать множества, являющиеся подмножествами $ГДЗ^I$, что, собственно говоря, подтверждается практикой. Применительно к $ГДЗ$ такие подмножества без проблем обнаруживаются в соответствующих предметных областях.

Поэтому, если исходный набор отношений представлен только A -форматными отношениями, то формат результирующего отношения может быть определен только экспертом.

Рассмотрев 3-арные отношения, перейдем к отношениям следующего порядка. Используя операции естественного соединения и исходный набор отношений, получим $ГДЗЛ$:

$$ГДЗЛ^P = ГД^A \bowtie ДЗ^P \bowtie ДЛ^P \bowtie ЛЗ^P,$$

который будет иметь P -формат.

Содержимое $ГДЗЛ^P$ будет показывать, какие дисциплины и какие виды занятий в них в состоянии вести преподаватели.

Поскольку и $ГДЗ^P$, и $ДЗЛ^P$, и $ГДЗЛ^P$ были получены из исходных отношений: $ГД$, $ДЗ$, $ДЛ$ и $ЛЗ$, осталось выяснить, не связаны ли каким-то образом $ГДЗ^P$, $ДЗЛ^P$ и $ГДЗЛ^P$ друг с другом.

Семантически — это все разные факты. В то же время, $ГДЗЛ^P$ может быть найдено и как $ГДЗ^P \bowtie ДЗЛ^P$, что не существенно, поскольку дает тот же результат, что и $ГД^A \bowtie ДЗ^P \bowtie ДЛ^P \bowtie ЛЗ^P$.

Но что будет, если формат $ГДЗ$ и $ДЗЛ$ изменится с P на A ? Результатом естественного соединения $ГДЗ^A$ и $ДЗЛ^A$, как видно из рис. 15, станет $ГДЗЛ$.

Если исключить из $ГДЗЛ$ кортеж t_1 или t_2 и (или) удалить один из двух кортежей — t_4 или t_5 , то две проекции $ГДЗЛ$ — $Пр_{ДЗЛ}(ГДЗЛ)$ и $Пр_{ГДЗ}(ГДЗЛ)$ — дадут соответственно $ДЗЛ^A$ и $ГДЗ^A$. Следовательно, $ГДЗЛ^A$ первично по отношению к $ДЗЛ^A$ и $ГДЗ^A$, а $ДЗЛ^A$ и $ГДЗ^A$ выводимы из $ГДЗЛ^A$.

С учетом всего вышеизложенного можно прийти к итоговой схеме отношений, увязывающей комплекс исходных бинарных и производных от них 3- и 4-арных отношений (рис. 16).

Пунктирной линией очерчены производные отношения, сплошной — единственное первичное отношение $ГДЗЛ^A$, которое подлежит хранению. Отсюда, в частности, следует, что если в $Document_3_H$, $ГДЗЛ$ принадлежит A -формату, то оно должно быть преобразовано в R -тип. В противном случае, если $ГДЗЛ$ помечено как P -формат, то R -тип, замещающий $ГДЗЛ^A$, не формируется. Но остается от-

$ДЗЛ^A$			$ГДЗ^A$		
Д	З	Л	Г	Д	З
Ин	Лк	А	1	Ин	Лк
Ин	Пр	А	1	Ин	Пр
Мт	Лк	Б	2	Ин	Лк
Ин	Лк	Б	3	Мт	Лк

$ГДЗЛ^A = ДЗЛ^A \bowtie ГДЗ^A$				
	Г	Д	З	Л
t_1	1	Ин	Лк	А
t_2	1	Ин	Лк	Б
t_3	1	Ин	Пр	А
t_4	2	Ин	Лк	А
t_5	2	Ин	Лк	Б
t_6	3	Мт	Лк	Б

$Пр_{ДЗЛ}(ГДЗЛ^A)$			$Пр_{ГДЗ}(ГДЗЛ^A)$		
Д	З	Л	Г	Д	З
Ин	Лк	А	1	Ин	Лк
Ин	Пр	А	1	Ин	Пр
Мт	Лк	Б	2	Ин	Лк
Ин	Лк	Б	3	Мт	Лк

Рис. 15. Результаты естественного соединения исходных отношений и последующих проекций полученного результирующего отношения

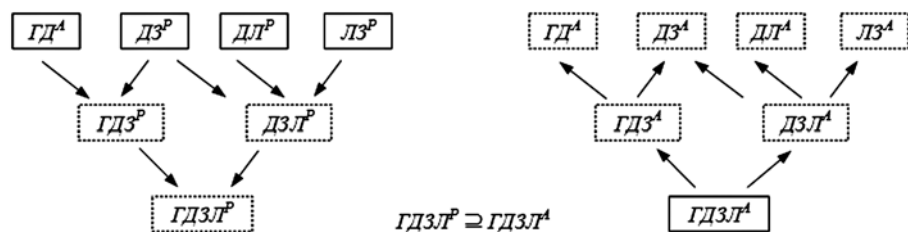


Рис. 16. Первичные и производные отношения логической модели

крытым вопрос, касающийся потенциальных R -типов, объединяющих внешние ключи двух других заголовочных структур: $Document_1_H$ и $Document_2_H$. $ГДЗ$ и $ДЗЛ$ могут относиться и (или) к P - или к A -форматам.

Воспользуемся той же самой логикой, что-бы решить, какие из отношений ($ГДЗ$ и (или) $ДЗЛ$) следует представлять в явном виде, а какие могут быть выведены из других отношений. (В явном виде означает, что они приобретают R -форму и сохраняются в базе данных.)

Если $ГДЗ$ и (или) $ДЗЛ$ имеют P -формат, то они выводимы, и необходимость в их сохранении отпадает. В противном случае, одно из них или оба отношения (будучи семантически не связаны друг с другом) приобретают R -форму и включаются в логическую модель.

Подведем промежуточные итоги. Вопросы, рассмотренные в настоящем разделе, позволяют решить одновременно несколько задач:

- идентифицировать и определять формат 3- и более арных отношений, в формировании которых участвует комплект бинарных отношений;
- устанавливать выводимые 3- и более арные отношения, а также первичные отношения (включая и бинарные), подлежащие хранению;
- задавать ограничения по составу сохраняемых типов.

4. Сцепленные рилейтеры и актуальные задачи моделирования сцепленных типов

Ранее было отмечено, что для исчерпывающего, унифицированного представления сущностей требуется кластер, образованный *Prototype* (P), *Sample* (S) и *Instance* (I)-подтипами, функционально связанными друг с другом. Покажем, в каких ассоциациях окажутся рилейтеры, сконфигурированные из одних и тех же типов, но различающиеся "собственными" подтипами — P -, S - или I -подтипами, являющимися родительскими по отношению к R -типам. Воспользуемся тем же примером рилейтора (см. рис. 11), который ранее объединял "методики", "оборудование" и "личности".

Пусть имеются два заголовочных документальных типа: $Document_1_H$ и $Document_2_H$. Один из внешних ключей первого типа — O^P — ссылается на прототип (модель, марку) оборудования, а другой — O^I — на конкретный экземпляр оборудования, который принадлежит этой модели (рис. 17).

Один из вариантов замещения возникающих 3-арных отношений $W_1\{M, O^P, L\}$ и $W_2\{M, O^I, L\}$ приведет к появлению двух рилейторных типов: R_1 и R_2 , между атрибутами внешних ключей которых — $\bar{O}^I$ и $\bar{O}^P$ — установится функциональная зависимость $f: \bar{O}^I \rightarrow \bar{O}^P$. В этом плане об R_1 и R_2 можно говорить как о сцепленных R -типах.

Если проанализировать содержимое отношений R_1 и R_2 , то в них обнаружится большое число избыточных, дублирующих друг друга данных, обусловленное тем, что домены $\bar{M}^I$ и $\bar{L}^I$, соответствующие R_1 и R_2 , будут пересекаться.

Представленная на рис. 17 конфигурация R -кластера — не единственная. Атрибутный состав и наполнение R_1 - и R_2 -типов, скорее всего, изменится для отдельных сочетаний исходных p - и a -фактов.

Перечисленное может составить предмет дальнейших исследований, результатом которых должно стать получение универсальных шаблонных подходов для представления

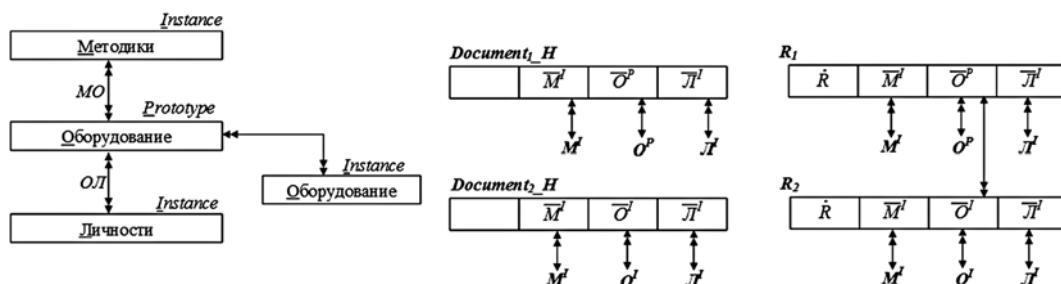


Рис. 17. Сцепленные райлейтеры

n -арных отношений и соответствующих им R -типов в логических конструкциях.

Заключение

Альтернативные формы представления некоторых классов ассоциаций между сущностями в качестве самодостаточных объектов известны давно, равно как и проблема обнаружения и последующего моделирования высокоуровневых отношений. Мы обратили внимание на тесную взаимосвязь указанных задач. Оказалось, что такие объекты, как документы, в частности, в своей заголовочной части, содержат исчерпывающую информацию, указывающую на присутствие n -арных отношений.

Разработанная технология анализа и конфигурирования высокоуровневых типов строится с привлечением некоторых глагольных форм естественного языка, позволяющих различать в рамках одного класса отношений потенциальные и фактические отношения-факты. В работе приводится обоснование первичности фактических и вторичности потенциальных n -арных фактов по отношению к аналогичным бинарным фактам, которые всегда устанавливаются на начальных фазах моделирования вне зависимости от применяемого метода моделирования. Тем самым появляется возможность выявить первичный набор отношений в предметной области, из которого впоследствии с помощью операций проекций или естественного соединения могут быть получены все другие актуальные для предметной области отношения. Параллельно решается задача выбора формы представления первичных отношений — в виде или W -типов, или R -типов.

В заключение очертим некоторые направления перспективных исследований, которые могут быть выполнены, если отталкиваться от результатов настоящей работы.

Сформированный каркас первичных отношений может служить базисом для конфигурирования еще одного подкласса отношений,

которые в работе обозначены как "состоявшиеся" отношения. Кроме упомянутых выше универсальных шаблонов, вследствие того, что предметные области — динамические системы с изменяемой структурой отношений, не менее актуальны решения по сохранности уже имеющихся данных при переходах от одних шаблонных схем к другим с увеличением или уменьшением арности p -отношений.

Список литературы

1. McAllister A. Complete rules for n -ary relationship cardinality constraints // Data and knowledge engineering. 1998. No. 27. P. 255—288.
2. Jones T. H., Song Y. Analysis of binary/ternary combinations in entity-relationship modeling // Data and knowledge engineering. 1995. No. 19. P. 39—64.
3. Krishna P. R., Khandekar A., Karlapalem K. Modeling dynamic types for subsets of entity type instances and across entity types // Information systems. 2016. V. 60. P. 114—126.
4. Armstrong W. W. Dependency structures of database relations // Proceedings of IFIP congress. 1974. P. 580—583.
5. Fagin R. Multivalued dependencies and new normal form for relational databases // ACM transactions database systems. 1977. No. 2(3). P. 262—278.
6. Мейер Д. Теория реляционных баз данных. М.: Мир, 1987. 608 с.
7. Kohler Hp. R., Link S. SQL schema design: foundation, normal forms and normalization // Information systems. 2018. V. 60. P. 88—113.
8. Ling T. A normal form for entity-relationship diagrams // Proceedings 4th International Conference on ER Approach. 1985. P. 24—35.
9. Storey V. C. Comparing relationships in conceptual modeling: mapping to semantic classifications // IEEE Transactions on knowledge and data engineering. 2005. Vol. 17, N. 11. P. 1478—1489.
10. Guarino N., Guizzardi G. We need to discuss the relationship: revisiting relationships as modeling constructs // International Conference on Advanced Information Systems Engineering. 2015. P. 279—294.
11. Fonseca C. M., Porello D., Guizzardi G., Almeida J. P. A., Guarino N. Relations in ontology-driven conceptual modeling // Conceptual modeling. 38-th international conference, ER 2019. P. 28—42.
12. Olive A. Conceptual modeling of information systems. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. P. 471.
13. Halpin T., Morgan T. Information modeling and relational databases. Morgan Kaufmann Publishers, 2008. 970 p.
14. Martin J. Information engineering. Planning & Analysis. Book 2. Prentice Hall, 1990.
15. Guizzardi G. Ontological foundations for structural conceptual models. Center for Telematics and Information Technology, University of Twente, The Netherlands, 2005. 441 p.

16. Hartman S., Link S. English sentences structures and ERR modeling // The fourth Asia-pacific conference on conceptual modeling. Conferences in research and practice in information technology. 2007. Vol. 67. P. 27–35.

17. Chen P. P. English sentence structure and entity-relationships diagrams // Information science. 29. P. 127–149.

18. Ghash S., Mukherjee P., Chakraborty B., Bashar R. Automated Generation of E-R Diagram from a Given Text in Natural Language // 2018 International Conference on Machine Learning and Data Engineering (iCMLDE).

19. Родионов А. Н. "Мигрирующие" объекты моделей данных: "слабые сущности" и документы // Вестник ХГАЭП. 2011. № 1. С. 40–65.

20. Родионов А. Н. Семантическая идентификация, конфигурирование и моделирование типов сущностей в моделях данных // Вестник НГУ. Сер. Информационные технологии. 2014. Т. 12, Вып. 1. С. 64–78.

21. Родионов А. Н. Абстрактные роли и примитивы ролевого моделирования сущностей в системе "концептуальная—логическая—физическая модели данных" // Информационные технологии. 2019. Т. 25. № 4, С. 451–466.

A. N. Rodionov, Dr. of Tech. Sc.,

Computer Centre of Far-Eastern Branch of RAS, e-mail: ran@newmail.ru

Conceptual and Logical Data Modeling: Detection and Configuration of R -types and n -ary Relationships in Domains

The paper addresses the problems of detecting and configuring complexes of high-level database relationships (relationships with arity 3 and above) and representing part of the latter by means of R -types. R -type is one of the categories of synthetic object types whose instances are associated with links that occur between objects. Such types can come with their own properties and can interact with other objects. It is pointed out that multi-valued functional dependencies, which can be present among the foreign key attributes of header document types, uniquely identify both the n -ary relations themselves and the corresponding R -types. R -types that replace n -ary relations eliminates the occurrence of tuple update anomalies in the header documentary types. We study the influence of different relationship cardinality constraints that involve multiple entity types on the attribute composition of the corresponding R -types. It is introduced the concept of a binary relations hipscomplex that subsume initial interacting types. On the basis of the proposed p/a criteria for binary relations, which allows to distinguish potential and actual relations of a complex, it is developed a method for ascertaining primary relations that are subject to storage, and secondary relations that derive from primary ones. It is concluded that all high-level p -relations can be deduced (by means of natural join operation) from potential binary relations, and all binary a -relations can be obtained by applying projection operations to some source n -ary a -relation, if one exists in the domain. In conclusion, an example of linked R -types that may appear in entity type clusters is given, and current modeling problems are listed.

Keywords: high-level relationships, R -types, p/a -binary relations, multi-valued dependences, PSI entity cluster

DOI: 10.17587/it.26.460-471

References

1. McAllister A. Complete rules for n -ary relationship cardinality constraints, *Data and Knowledge Engineering*, 1998, no. 27, pp. 255–288.

2. Jones T. H., Song Y. Analysis of binary/ternary combinations in entity-relationship modeling, *Data and Knowledge Engineering*, 1995, no. 19. pp. 39–64.

3. Krishna P. R., Khandekar A., Karlapalem K. Modeling dynamic types for subsets of entity type instances and across entity types, *Information Systems*, 2016, vol. 60, pp. 114–126.

4. Armstrong W. W. Dependency structures of database relations, *Proceedings of IFIP congress*, 1974, pp. 580–583.

5. Fagin R. Multivalued dependences and new normal form for relational databases, *ACM transactions database systems*, 1977, no. 2(3), pp. 262–278.

6. Maier D. The theory of relational databases, Moscow, Mir, 1987, 608 p. (in Russian).

7. Kohler Hp. R., Link S. SQL schema design: foundation, normal forms and normalization, *Information systems*, 2018, vol. 60, pp. 88–113.

8. Ling T. A normal form for entity-relationship diagrams, *Proceedings 4th International Conference on ER Approach*, 1985, pp. 24–35.

9. Storey V. C. Comparing relationships in conceptual modeling: mapping to semantic classifications, *IEEE Transactions on knowledge and data engineering*, 2005, vol. 17, no. 11, pp. 1478–1489.

10. Guarino N., Guizzardi G. We need to discuss the relationship: revisiting relationships as modeling constructs, *International conference on advanced information systems engineering*, 2015, pp. 279–294.

11. Fonseca C. M., Porello D., Guizzardi G., Almeida J. P. A., Guarino N. Relations in ontology-driven conceptual modeling,

Conceptual modeling. 38-th international conference, ER 2019, 2019, pp. 28–42.

12. Olive A. Conceptual modeling of information systems, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007, p. 471.

13. Halpin T., Morgan T. Information modeling and relational databases, Morgan Kaufmann Publishers, 2008, 970 p.

14. Martin J. Information engineering, Planning & Analysis. Book 2, Prentice Hall, 1990, 497 p.

15. Guizzardi G. Ontological foundations for structural conceptual models, Center for Telematics and Information Technology, University of Twente, The Netherlands, 2005, 441 p.

16. Hartman S., Link S. English sentences structures and ERR modeling, *The fourth Asia-pacific conference on conceptual modeling. Conferences in research and practice in information technology*, 2007, vol. 67, pp. 27–35.

17. Chen P. P. English sentence structure and entity-relationships diagrams, *Information science*, 29, pp. 127–149.

18. Ghash S., Mukherjee P., Chakraborty B., Bashar R. Automated generation of E-R diagram from a given text in natural language, *International Conference on machine learning and data engineering (iCMLDE)*, 2018, pp. 112–117.

19. Rodionov A. N. Migrating objects of data models: weak entities and documents, *Vestnik KSAEL*, 2011, no. 1, pp. 40–65 (in Russian).

20. Rodionov A. N. Semantic identification, configuration and entities types modeling for the data model engineering, *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2014. vol. 12, no. 1, pp. 64–78 (in Russian).

21. Rodionov A. N. The abstract roles and the primitives of role modeling in the conceptual, logical, and physical data models system, *Information Technologies*, 2019, vol. 25, no. 8, pp. 451–466 (in Russian).

В. А. Бимаков, директор, e-mail: robint@mail.ru,
Е. В. Бимаков, руководитель отдела, e-mail: robint@mail.ru,
ООО "Воксельная техника", г. Ижевск

Повышение скорости и качества анализа 3D-сцен, сканируемых датчиками автономного робота

Рассматриваются вопросы построения и функционирования систем компьютерного зрения (СКЗ), предназначенных для использования в системах управления (СУ) сверхадаптивных автономных роботов (АР). Дается определение качества геометрического анализа сцены, выполняемого в СКЗ АР. Приводится обобщенный алгоритм функционирования СКЗ АР, базирующийся на применении сверхскоростной аппаратно-программной технологии обработки сцен (воксельной АПТОС). На примере реализации отдельных процедур этого алгоритма демонстрируются преимущества применения воксельной АПТОС для построения на ее основе СУ сверхадаптивных АР, предназначенных для функционирования в условиях геометрически сложной и геометрически быстроизменяющейся внешней среды.

Ключевые слова: компьютерное зрение, адаптивность автономных роботов, вычислительные технологии обработки 3D-сцен, геометрические примитивы, геометрические модели 3D-объектов, распознавание 3D-объектов

1. Геометрический анализ 3D-сцен, выполняемый в системе компьютерного зрения автономного робота, критерий качества этого анализа

По скорости и адекватности реагирования автономных роботов (АР) на геометрическую форму, габаритные размеры и местоположение 3D-объектов, окружающих АР и наблюдаемых АР визуально, современные АР до сих пор значительно уступают человеку и животным. Это сильно снижает конкурентоспособность современных АР, ограничивает потенциальные возможности их применения, сдерживает уровень автоматизации и рост производительности труда в различных сферах человеческой деятельности.

В АР анализ геометрии 3D-объектов, визуально наблюдаемых АР, возложен на его бортовую систему компьютерного зрения (СКЗ АР). Геометрические анализы, выполняемые СКЗ АР, всегда являются проблемно-ориентированными и направлены, главным образом, не на максимально точное определение истинных геометрических характеристик исследуемых 3D-объектов, а носят узкий потребительский характер. Целью проведения этих анализов яв-

ляется определение того факта, каким образом указанные геометрические характеристики могут помочь (или помешать) выполнить АР конкретную прикладную робототехническую задачу (ПРЗ), стоящую перед АР в данный момент времени (транспортировка груза, выполнение погрузочно-разгрузочных работ, разведка местности, охрана территории, ведение боевых действий и т.п.).

В СКЗ АР источником исходной информации о геометрии содержимого исследуемой 3D-сцены являются дальнедействующие сканирующие датчики (видеодатчики), установленные на борту АР (видеокамеры, лазерные сканеры, стереокамеры, RGBD-датчики, ToF-датчики и т.п.). В процессе функционирования АР эти видеодатчики (один или несколько) сканируют область $F_S \subset R^3$ исследуемой сцены (где R^3 — трехмерное евклидово пространство). Область F_S назовем форматом исследуемой 3D-сцены. Объединение точек, принадлежащих всем 3D-объектам, входящим в исследуемую сцену и расположенных внутри F_S , образует точечное множество $E_S \subseteq F_S$, которое собственно и является объектом геометрического исследования (по-другому: анализируемым содержимым F_S -форматной сцены или

обобщенным геометрическим объектом исследуемой 3D-сцены). Главной особенностью сцен, исследуемых при решении большинства ПРЗ, является сверхвысокая геометрическая сложность E_S и изменчивость E_S во времени.

Система управления АР (СУ АР, в состав которого входит СКЗ АР), опираясь на результаты исследования сцены, а также на текущее состояние исполнительных органов АР, принимает управленческое решение (УР), определяющее будущее поведение АР в ближайший промежуток времени и направленное на решение текущей ПРЗ. В зависимости от типа ПРЗ геометрические характеристики E_S влияют на выбор УР в следующих случаях:

1) когда УР формируется непосредственно по результатам геометрического исследования сцены, включающего: синтез геометрической модели содержимого сцены E_S (ГМС) и проблемно-ориентированный анализ синтезированной ГМС;

2) когда УР формируется по результатам семантического исследования сцены, включающего: синтез семантической модели исследуемой сцены (СМС) [1], зависящей от результатов геометрического анализа ГМС, а также проблемно-ориентированный семантический анализ синтезированной СМС.

УР, найденное СУ АР, позже реализуется ею физически: путем подачи (в определенном порядке) необходимых управляющих сигналов на исполнительные органы АР (сервоприводы, реле и т.п.). Все эти этапы (синтез и анализ ГМС, синтез и анализ СМС, принятие и физическая реализация УР) должны выполняться СУ АР в течение временного интервала, так называемого периода управляющего цикла АР (УЦ) [2, 3]. При этом действует соглашение: ГМС и СМС, синтезированные в начале УЦ, считаются СУ АР полностью детерминированными и неизменными во времени вплоть до окончания текущего УЦ. Следовательно, для повышения адаптивности АР к изменениям E_S период УЦ необходимо сокращать. Это соглашение нарушается лишь при возникновении запросов на прерывание, поступающих от близкодействующих датчиков АР (контактных, бесконтактных) и информирующих СУ АР об уже совершившемся факте недопустимого (т.е. не предусмотренного ранее принятым УР) сближения АР с потенциально опасным внешним объектом.

К ПРЗ *первого типа* относятся наиболее простые навигационные задачи АР: поиск безопасного (т.е. без столкновений) маршрута движения АР; распознавание объекта-ориентира по его форме и габаритным размерам.

К ПРЗ *второго типа* относятся более сложные ПРЗ, когда принятие УР требует помимо учета геометрии объектов исследуемой сцены также и учета их негеометрических свойств: цвета и звуков объектов; сложных проблемно-ориентированных функциональных связей между объектами сцены и т.п.).

Определить истинную геометрию E_S только по результатам одного видеомониторинга исследуемой 3D-сцены, как правило, не удастся. Существует бесконечное множество геометрических моделей-гипотез E_S , не противоречащих полученным видеоданным, но отличающихся своей геометрией и своей прикладной значимостью. К счастью, для решения большинства ПРЗ полного совпадения между истинной E_S и ее ГМС, участвующей на этапе проблемно-ориентированного геометрического анализа сцены, обычно не требуется. Качество синтеза ГМС и ее проблемно-ориентированного анализа могут считаться удовлетворительными, если УР, принятое СУ АР на основе анализа этой ГМС, удовлетворяет самым минимальным требованиям решаемой ПРЗ.

В работе [4] в качестве универсального метода геометрического анализа синтезированной ГМС предлагается использовать метод виртуального зондирования сцены (метод ВЗС). Суть метода заключается в последовательном виртуальном зондировании (ощупывании) различных участков исследуемой геометрической модели E_S с помощью геометрической модели зонда (виртуального щупа) $E_P \subset R^3$, имеющего известные габаритные размеры, форму и угловое положение. Перед каждым элементарным актом зондирования (ЭАЗ) геометрическая модель зонда E_P перемещается относительно неподвижной модели E_S в заданную точку F_S (точку зондирования). После этого вычисляется функция зондирования (ФЗ), роль аргументов в которой выполняют геометрическая модель E_S и геометрическая модель перемещенного зонда E_P . Конкретный вид ФЗ зависит от цели геометрического зондирования E_S (определение взаимной пересеканости геометрических моделей E_S и E_P ; вычисление объема области пересечения этих моделей и т.п.). Изменяя местоположение и порядок выполнения ЭАЗ, а также конкретный вид применяемой ФЗ, можно использовать метод ВЗС для решения самых разных ПРЗ: от задач поиска траекторий движения АР до задач распознавания объектов, обладающих заданными габаритными размерами и геометрической формой [4].

К сожалению, эффективность метода ВЗС чрезвычайно сильно зависит от применяемой

вычислительной технологии обработки сцен (ТОС), основными компонентами которой являются: применяемый метод геометрического моделирования; тип применяемого вычислителя; методы обработки применяемых геометрических моделей, базирующиеся на возможностях используемого вычислителя. От выбора конкретной ТОС сильно зависят: скорость перемещения модели зонда E_p внутри виртуального пространства, скорость извлечения данных о текущем зондируемом участке модели E_s из памяти вычислителя, а также скорость вычисления значений выбранной ФЗ.

2. Различные виды ТОС и перспективы их применения в СКЗ АР

2.1. Традиционные виды ТОС. Множество E_s может иметь бесконечное число вариаций (от $E_s = \emptyset$ до $E_s = F_s$). Отобразить в памяти СКЗ АР все это бесконечное разнообразие E_s с помощью конечного числа двоичных накопителей СКЗ АР не представляется возможным. Спасает положение моделирование E_s с помощью геометрических примитивов (ГП), что неизбежно приводит к снижению точности представления E_s в СКЗ АР. Выбор базиса ГП (БГП) и способа описания ГП во многом определяют выбор двух других компонентов ТОС: типа вычислителя и методов обработки геометрических моделей посредством данного вычислителя.

Из известных ТОС, применение которых в СКЗ АР считается научно обоснованным, наибольшими отличиями обладают нейросетевые ТОС и аппаратно-программные ТОС (АПТОС). Из-за технической нереализуемости нейронных систем человека и животных эти системы сейчас не могут быть использованы в СКЗ АР. Опыт применения искусственных нейронных сетей для решения задач видеонавигации АР пока нельзя назвать успешным (в лучшем случае применение их можно назвать эффективным лишь при решении весьма узкого круга вспомогательных подзадач, связанных, в основном, с распознаванием плоских проекций 3D-объектов-ориентиров). В связи с этим основное внимание уделим АПТОС, доказавшим на практике возможность их успешного применения в СКЗ АР. В отличие от нейросетей АПТОС позволяют:

- исключить обязательный предварительный этап обучения СКЗ АР;
- математически обосновать принимаемое УР, опираясь как на результаты текущего видеонаблюдения сцены, так и на богатый математический аппарат (веками наработанный

человечеством), а не просто довериться нейросети (ранее обученной пусть в похожих, но все же других внешних условиях).

Сейчас в СКЗ АР применяются следующие традиционные АПТОС [5]:

- АПТОС, базирующиеся на применении универсальных компьютеров (CPU), содержащих одно или несколько (до десятка) вычислительных ядер;
- АПТОС (называемые еще CUDA-технологиями), базирующиеся на применении графических процессоров (GPU), содержащих сотни процессоров и относящихся к многопроцессорным системам конвейерного типа [6, 7].

Все эти традиционные АПТОС объединяет много общего:

- системы команд их программируемых вычислителей (ПВ) оперируют только адресуемыми двоичными числами (или, по-другому, одномерными адресуемыми бинарными изображениями — 1D-АБИ), т.е. их ПВ предназначены для арифметической или булевой обработки только двоичных чисел (1D-АБИ);
- геометрические модели обрабатываемых 2D- и 3D-объектов описываются с помощью числовых переменных (координат точек, коэффициентов уравнений и т.п.) и представлены в памяти ПВ в виде массивов адресуемых байтов, машинных слов и т.п. (т.е. в виде массивов 1D-АБИ);
- методы обработки геометрических моделей в указанных традиционных АПТОС базируются исключительно на арифметической обработке 1D-АБИ (методы аналитической геометрии, линейной алгебры, числовых матричных преобразований, числовой обработки цифровых изображений и т.п.).

Главным и неоспоримым преимуществом традиционных (т.е. числовых) АПТОС является сверхвысокая точность описания и высокая скорость обработки числовых геометрических моделей, "собранных" из относительно небольшого числа традиционных ГП. Именно эти качества традиционных АПТОС сделали их столь успешными при решении задач САПР и компьютерной графики. По этой же причине использование (хотя бы временное) традиционной АПТОС в СУ АР будет безальтернативным, если геометрическая модель распознаваемого проблемно-значимого 3D-объекта (ПЗО), приведенная в исходных условиях решаемой ПРЗ, построена на базе использования традиционных САПР. В противном случае низкая точность распознавания ПЗО может привести к принятию неверных УР.

2.2. Недостатки применения традиционных АПТОС в СКЗ АР. Огромным недостатком традиционных АПТОС, с точки зрения их использования в СКЗ сверхадаптивных АР, является недопустимо низкая скорость синтеза и анализа ГМС, поскольку E_S , характерные для большинства ПРЗ, обладают сверхвысокой геометрической сложностью и непостоянством во времени. Данный недостаток традиционных АПТОС, по мнению авторов, объясняется низкой степенью распараллеливания операций и процедур обработки, наиболее часто используемых при синтезе и анализе сцен (так называемых основных процедур обработки сцен — ОПОС [8, 9]). К ОПОС относятся:

- теоретико-множественные операции над геометрическими моделями;
- анализ геометрических моделей на пересеканность;
- аффинные геометрические преобразования;
- операции вычисления объема (площади) геометрической модели;
- операции по локализации местоположения 3D-модели в пространстве.

Глубокое распараллеливание процесса выполнения ОПОС, участвующих в геометрическом анализе E_S (например: поворотов и переносов виртуального зонда; вычисление ФЗ и т.п.), способно на несколько порядков сократить время выполнения такого анализа и тем самым многократно повысить адаптивность АР. Степень предельного распараллеливания процедуры выполнения ОПОС с применением выбранной АПТОС удобно оценить минимальным числом тактов, требующимся для выполнения ОПОС с помощью той или иной АПТОС. Максимальное (абсолютное) распараллеливание достигается, если ОПОС выполняется средствами АПТОС за время, сравнимое с одним тактом ПВ.

В традиционных АПТОС при обработке сцен наибольшее применение нашел метод моделирования произвольных 3D-объектов многогранниками [5]. При данном методе моделирования функцию ГП выполняют полупространства, описываемые неравенствами вида $f \leq 0$, где $f = Ax + By + Cz + D$. "Сборка" всей модели 3D-объекта выполняется с помощью дизъюнкции систем неравенств данного вида. Выполнение аффинных преобразований над объектом-многогранником состоит в вычислении коэффициентов A', B', C', D' полупространств-образов по значениям коэффициентов A, B, C, D их полупространств-преобразов согласно формулам

$$\begin{aligned} A' &= a_A A + b_A B + c_A C + d_A D; \\ B' &= a_B A + b_B B + c_B C + d_B D; \\ C' &= a_C A + b_C B + c_C C + d_C D; \\ D' &= a_D A + b_D B + c_D C + d_D D, \end{aligned}$$

где коэффициенты $a_A, b_A, c_A, d_A, a_B, b_B, c_B, d_B, a_C, b_C, c_C, d_C, a_D, b_D, c_D, d_D$ — числовые константы. Отсюда следует, что выполнение любого аффинного преобразования не может быть осуществлено за время, меньшее, чем время, необходимое для последовательного выполнения одного арифметического умножения, двух арифметических сложений и двух межпроцессорных передач (т.е. за время, значительно большее, чем один такт ПВ).

Процедуры анализа машинных моделей объектов на пересеканность являются процедурами, наиболее часто используемыми при анализе сцен. Пусть необходимо установить пересеканность произвольных объектов $E_1, \dots, E_k$ между собой. Предположим, что каждый объект E_i (где $1 \leq i \leq k$) моделируется в ПВ в виде многогранника, описываемого дизъюнкцией неравенств:

$$\begin{cases} A_{i1}x + B_{i1}y + C_{i1}z + D_{i1} \leq 0; \\ \vdots \\ A_{iV(i)}x + B_{iV(i)}y + C_{iV(i)}z + D_{iV(i)} \leq 0; \\ \dots \\ A_{iH(i)}x + B_{iH(i)}y + C_{iH(i)}z + D_{iH(i)} \leq 0; \\ \vdots \\ A_{iW(i)}x + B_{iW(i)}y + C_{iW(i)}z + D_{iW(i)} \leq 0. \end{cases}$$

Вычисление значений левой части указанных неравенств приведет к неизбежной депараллелизации процесса анализа многогранников на пересеканность. Отсюда следует, что анализ на пересеканность точки (x', y', z') с объектом E_i не может быть выполнен быстрее времени, необходимого для параллельного вычисления значения $Ax + By + Cz + D$, т.е. не быстрее времени, затрачиваемого на последовательное выполнение одного арифметического умножения, двух арифметических сложений, двух межпроцессорных передач.

Проведение анализа на пересеканность двух объектов-многогранников требует еще больших затрат машинного времени, чем описанный выше анализ на пересеканность точки и одного многогранника. Действительно, простейший анализ на пересеканность двух выпуклых многогранников заключается в нахождении хотя бы одной грани анализируемого многогранника, плоскость $Ax + By + Cz + D = 0$, которой является для анализируемых много-

гранников разделяющей (т.е. когда координаты вершин одного из многогранников удовлетворяют неравенству $Ax + By + Cz + D < 0$, а координаты вершин другого — неравенству $Ax + By + Cz + D > 0$). Поскольку исходными элементами описания моделей-многогранников служат неравенства, описывающие примитивы-полупространства, из которых "собранны" анализируемые многогранники, то алгоритм выполнения анализа на пересекимость должен включать в себя два обязательных последовательно выполняемых этапа:

- 1) этап вычисления координат вершин анализируемых многогранников;
- 2) этап поиска разделяющих плоскостей.

Определение координат вершины многогранника осуществляется путем решения системы из трех уравнений, описывающих плоскости трех граней этого многогранника. Отсюда (по правилу Крамера) вычисление координат анализируемых вершин выпуклых многогранников не может быть проведено быстрее времени, необходимого для последовательного выполнения двух умножений, трех сложений, одного деления, четырех межпроцессорных передач. Анализ на пересекимость двух произвольных невыпуклых многогранников основан на анализе на пересекимость выпуклых многогранников, входящих в состав анализируемых невыпуклых многогранников, поэтому достижимая степень распараллеливания здесь будет еще ниже, чем в ранее рассмотренном случае анализа на пересекимость двух произвольных выпуклых многогранников.

Вычисление объема произвольного многогранника заключается в суммировании значений объемов простейших многогранников, из которых составлен данный произвольный многогранник. Простейшим многогранником, входящим в состав любого многогранника, является треугольная пирамида. Объем треугольной пирамиды $V_{\text{тп}}$, ребрами которой служат векторы $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{c}$, равен $V_{\text{тп}} = |\mathbf{abc}|/6$, где $|\mathbf{abc}|$ — смешанное произведение векторов $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{c}$. Пусть в правом ортонормированном базисе заданы векторы $\mathbf{a} = (x_a, y_a, z_a)$, $\mathbf{b} = (x_b, y_b, z_b)$, $\mathbf{c} = (x_c, y_c, z_c)$.

Тогда

$$|\mathbf{abc}| = \begin{vmatrix} x_a & y_a & z_a \\ x_b & y_b & z_b \\ x_c & y_c & z_c \end{vmatrix}; \quad V_{\text{тп}} = (x_a(y_b z_c - z_b y_c) - y_a(x_b z_c - z_b x_c) + z_a(x_b y_c - y_b x_c))/6.$$

Следовательно, вычисление объема произвольного многогранника не может быть выполнено быстрее времени, необходимого для последовательного выполнения двух умножений, трех сложений, двух межпроцессорных передач.

Объединение многогранников, их пересечение или разность предполагают выполнение процедур анализа объектов-многогранников на пересекимость (в целях удаления ложных вершин в результирующем многограннике, синтезированном из нескольких многогранников), поэтому степень максимального распараллеливания указанных операций здесь будет не меньше, чем при анализе объектов на пересекимость.

Тем не менее даже эти теоретически низкие возможности традиционных АПТОС по распараллеливанию ОПОС являются часто недостижимыми для современных бортовых процессоров CPU и GPU, применяемых сейчас в СКЗ АР. Другим фактором, снижающим скоростные возможности традиционных АПТОС, является близость тактовой частоты управления современных процессоров CPU и GPU к ее физическому пределу. Дальнейший рост тактовой частоты требует чрезвычайно громоздких и энергозатратных средств охлаждения ПВ, что крайне отрицательно может сказаться на эксплуатационных характеристиках бортовых СКЗ АР (их стоимости, массе, габаритных размерах, энергопотреблении). По этой же причине применение оптических и квантовых аналогов CPU (считающихся на сегодня самыми высокопроизводительными ПВ) в бортовых СКЗ АР (например, в малогабаритных и дешевых БПЛА) не представляется возможным.

2.3. Воксельная АПТОС и перспективы ее применения в СКЗ высокоадаптивных АР. На наш взгляд, наиболее перспективной для использования в СКЗ сверхадаптивных АР, является воксельная АПТОС, подробно описанная в работах [2, 3, 8, 9, 10]. Компонентами воксельной АПТОС являются:

1) воксельный вычислитель (ВВ), система команд которого содержит помимо команд обработки 1D-АБИ, также команды обработки 2D-АБИ (формата $q^3 \times q^3$) и команды обработки 3D-АБИ (формата $q^2 \times q^2 \times q^2$), где $q = 3, 4, 5, \dots$ — целое число (чем выше q , тем выше степень распараллеливания ОПОС);

2) дискретные 2D- (пиксельные) и 3D- (воксельные) геометрические модели, описываемые с помощью одного или нескольких 2D-АБИ или 3D-АБИ;

3) методы высокопараллельной обработки 2D- и 3D- бинарных, полутоновых и цветных изображений, базирующиеся на преимуществах ВВ по глубокому распараллеливанию ОПОС.

Для абсолютного распараллеливания процесса выполнения аффинных геометрических преобразований над одноцветным содержимым 2D-АБИ и 3D-АБИ эти преобразования моделируются в ВВ с помощью так называемых дискретизирующих отображений (ДО) [8, 9]. Рекордно высокая скорость выполнения геометрического анализа E_S средствами воксельной АПТОС достигается за счет абсолютного распараллеливания базового набора ОПОС над одноцветным содержимым 2D-АБИ или 3D-АБИ аппаратными средствами. Скорость выполнения ОПОС над воксельной геометрической моделью E_S , имеющей фиксированное разрешение, в ВВ не зависит от геометрии E_S и может быть увеличена не только за счет повышения тактовой частоты управления (как в традиционных АПТОС), но и за счет увеличения разрешающей способности 2D-АБИ и 3D-АБИ (даже без средств принудительного охлаждения ВВ).

При воксельной АПТОС роль ГП выполняют взаимно-непересекающиеся воксели-кубики $1 \times 1 \times 1$ (не содержащие поверхностных точек). Конечно, при одинаковой точности моделирования E_S воксельная геометрическая модель E_S будет содержать значительно большее число таких вокселей, чем число ГП (многогранников, фигур второго порядка и др.), описывающих тот же E_S путем использования традиционной (числовой) АПТОС. Тем не менее, из-за преимуществ воксельной АПТОС по глубокому распараллеливанию ОПОС скорость обработки воксельных моделей геометрически сложных E_S средствами воксельной АПТОС может на несколько порядков превышать скорость обработки традиционных (числовых) моделей-аналогов E_S .

Помимо повышения скорости обработки 2D- и 3D-сцен использование воксельной АПТОС снижает требования к применяемой элементной базе ВВ, уменьшает стоимость, энергопотребление, массу и габаритные размеры СКЗ АР.

3. Алгоритм работы СКЗ АР, использующей воксельную АПТОС

Обобщенный алгоритм работы СКЗ АР, базирующийся на применении воксельной АПТОС и позволяющий обеспечить высокую адаптивность АР, включает в себя следующие последовательно выполняемые процедуры [2]:

- 1) обнуление и запуск таймера УЦ АР;
- 2) ввод видеоданных с выходов видеодатчиков АР в память СКЗ АР;
- 3) цифровая фильтрация и сжатие введенных видеоданных;
- 4) синтез (на основе отфильтрованных и сжатых видеоданных) параметрической псевдовоксельной 3D-модели E_S (ПМС). Для сканирующего дальномера (рис. 1, а) параметрами ПМС являются (рис. 1, б, в): целочисленная

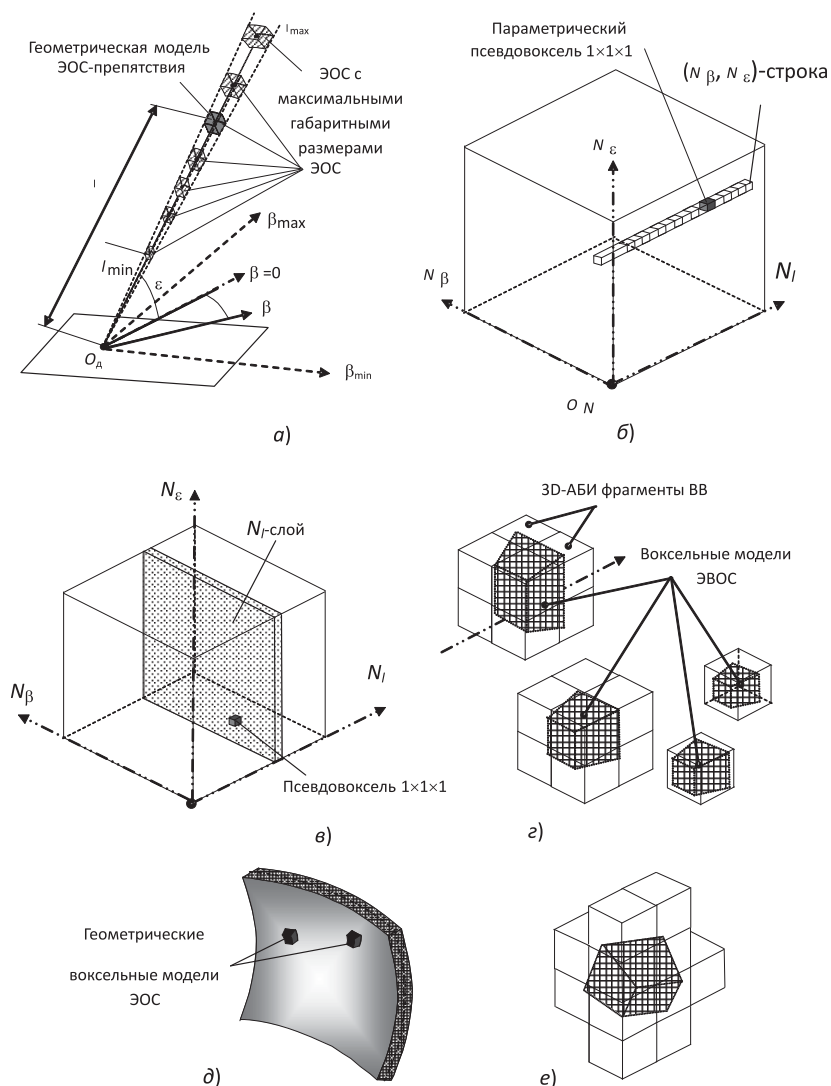


Рис. 1. Синтез воксельной модели сцены по данным сканирующего дальномера

дальность (или номер дальности N_l), целочисленный азимут (или номер азимута N_β), целочисленный угол места (или номер угла места N_ϵ). Для стереокамеры (рис. 2, см. вторую сторону обложки) параметрами ПМС являются: номер N_3 эпиполярной строки стереопары; номер $N_{\text{лев}}$ пикселя в N_3 -й эпиполярной строке левого изображения, номер $N_{\text{прав}}$ пикселя в N_3 -й эпиполярной строке правого изображения [2];

5) преобразование ПМС в воксельную геометрическую модель E_S (ВМС);

6) синтез (из ВМС) проблемно-значимых геометрических воксельных моделей-гипотез E_S (ПЗМГ), не противоречащих видеоданным, но трактующих (интерпретирующих) видимую часть E_S в особом проблемно-значимом виде. Для каждой такой (j -й) ПЗМГ вычисляются два ее интегральных параметра:

- точность представления E_S с помощью j -й ПЗМГ — Λ_j ;
- прикладная значимость j -й ПЗМГ с точки зрения решаемой ПРЗ — Ψ_j ;

7) предварительный отбор самой актуальной ПЗМГ (АМГ), обладающей максимальным значением прикладной значимости Ψ , из числа ПЗМГ, чьи предварительные значения Λ превысили некоторый порог $\Lambda_{\text{порог}}$;

8) уточнение значения Λ для ранее выбранной АМГ (т.е. $\Lambda_{\text{АМГ}}$) путем:

- увеличения разрешающей способности видеосканирования отдельных проблемно-значимых участков сцены, обнаруженных ранее при анализе АМГ;
- изменения ракурса видеосканирования исследуемой сцены.

При уточнении $\Lambda_{\text{АМГ}}$ основная решаемая ПРЗ может даже временно заменяться на вспомогательную ПРЗ, выполняемую АР только на момент уточнения $\Lambda_{\text{АМГ}}$;

9) если уточненная $\Lambda_{\text{АМГ}}$ стала меньше $\Lambda_{\text{порог}}$, текущая АМГ исключается из дальнейшего рассмотрения, новым АМГ назначается другая ПЗМГ (из числа ранее найденных), у которой Ψ имеет наибольшее значение, после чего СКЗ АР переходит к выполнению пункту 8 данного алгоритма;

10) если и уточненная $\Lambda_{\text{АМГ}}$ не меньше $\Lambda_{\text{порог}}$ (или у АР отсутствуют средства или время для уточнения $\Lambda_{\text{АМГ}}$), текущая АМГ назначается воксельной геометрической моделью содержимого сцены (ВМС);

11) из ВМС синтезируется геометрическая модель сцены (ГМС), при этом роль ГМС в зависимости от способа (заданного в исходных условиях ПРЗ) автоматического принятия УР (средствами СУ АР) выполняют:

- либо сама ВМС (если период УЦ чрезвычайно короток, а точность ВМС удовлетворяет требованиям решаемой ПРЗ);
- либо традиционная (т.е. числовая) геометрическая модель сцены (ЧМС);

12) из ГМС синтезируется главная анализируемая проблемно-ориентированная модель исследуемой сцены (ГАМС), при этом роль ГАМС выполняют:

- либо сама ГМС (если для принятия УР достаточно проведения геометрического анализа E_S);
- либо СМС, когда принятие УР помимо геометрического анализа E_S требует и выполнение семантического анализа содержимого сцены;

13) синтезированная ГАМС анализируется в целях поиска оптимального УР, после чего запускаются программы, физически реализующие найденное УР и действующие до окончания текущего УЦ АР;

14) с окончанием УЦ (по прерыванию от таймера УЦ) СКЗ АР возвращается к пункту 1 данного алгоритма, иницируя новый УЦ АР.

Подробное описание каждой из указанных процедур и описание применяемых в них моделей E_S приведено в работе [2]. Здесь же отметим лишь главные преимущества данного алгоритма, позволяющие поднять (вплоть до рекордно высоких значений) адаптивность АР и расширить возможности АР.

4. Преимущества СКЗ АР, построенных на базе воксельной АПТОС

4.1. Возможность сверхскоростного синтеза геометрической модели E_S . Исходные данные об исследуемой сцене, получаемые от сканирующих видеодатчиков, уже изначально являются дискретными (из-за природы функционирования этих датчиков). Поэтому ВВ на этапе ввода и фильтрации введенных видеоданных, как минимум, не будут уступать традиционным (числовым) многопроцессорным SIMD-системам (так называемым пре-процессорам), специализирующимся на предобработке плоских изображений [2]. По той же самой причине вне зависимости от типа применяемого сканирующего датчика (сканирующего дальномера или стереокамеры) скорость синтеза дискретной параметрической модели сцены (ПМС) при использовании воксельной АПТОС тоже, как минимум, не будет уступать традиционным АПТОС [2].

Принципиально важной для СКЗ АР является возможность быстрого преобразования

ПМС в ВМС, когда промежуточная параметрическая модель E_S преобразуется в геометрическую модель E_G (представляющую собой, в отличие от ПМС, полноценный геометрический объект, принадлежащий пространству R^3). В современных высокоадаптивных СКЗ АР переход от ПМС к ВМС вообще не реализуется из-за чрезвычайно низкой скорости выполнения этого преобразования средствами традиционных АПТОС и из-за крайне высоких требований, предъявляемых к периоду УЦ АР. Поэтому в современных СКЗ АР проблемно-ориентированный геометрический анализ E_S вынужденно заменяется проблемно-ориентированным параметрическим анализом ПМС, что несомненно приводит к снижению адаптивности АР.

В ПМС каждая элементарная область сканирования (ЭОС) [2, 3] (см. рис. 1, а) представлена в виде псевдовокселя v (см. рис. 1, б), т.е. трехмерного параметрического дискрета [2, 3]), имеющего яркость: $\Phi(v) = 1$, если соответствующая ЭОС объявлена принадлежащей к модели E_S ; $\Phi(v) = 0$ — в противном случае. В ВМС каждая ЭОС представлена уже в виде евклидового геометрического 3D-тела (точечного множества), состоящего из объединения одного или нескольких взаимно непересекающихся геометрических вокселей $1 \times 1 \times 1$ (см. рис. 1, г, д, е). Геометрия воксельной модели каждой ЭОС и ее целочисленные координаты внутри воксельной модели F_S зависят от многих факторов: от типа применяемого видеодатчика; удаленности данной ЭОС от центра сканирования датчика; углов сканирования этой ЭОС [2, 3]. При использовании воксельной АПТОС сверхвысокая скорость выполнения ОПОС позволяет сверхбыстро преобразовать ПМС в ВМС [2] и выполнять качественный проблемно-ориентированный геометрический анализ E_S за рекордно малое время (десятые доли секунды и меньше).

4.2. Возможность сверхскоростного и качественного проблемно-ориентированного анализа геометрической модели E_S . Преимущество воксельной АПТОС (по сравнению с традиционными АПТОС) многократно возрастает при проведении проблемно-ориентированного геометрического анализа E_S благодаря высокой скорости выполнения ОПОС и высокой эффективности многоитерационного метода ВЗС, реализуемого на базе воксельной АПТОС [4]. Поэтому даже несмотря на явные недостатки воксельной АПТОС (низкая точность геометрических воксельных моделей, низкая точность моделирования геометрических преобразований с помощью ДО) для многих ПРЗ

вполне приемлемые УР могут быть получены при использовании только одной воксельной АПТОС.

В то же время существуют ПРЗ, для которых приемлемые УР могут получены только при одновременном использовании и воксельной АПТОС (обладающей высокой степенью распараллеливания ОПОС), и традиционной АПТОС (позволяющей с высокой точностью описывать и обрабатывать простые числовые геометрические 3D-модели-эталон, состоящие из относительно небольшого числа традиционных ГП: полупространств, фигур второго порядка и т.п.). В частности, это относится к ПРЗ, в исходных условиях которых геометрия ПЗО представлена в виде традиционных геометрических 3D-моделей, ранее синтезированных с применением традиционных средств САПР.

4.3. Возможность высокоскоростного и качественного синтеза семантических моделей исследуемых сцен. При решении ПРЗ второго типа (см. п. 1) скорость и качество геометрического анализа E_S влияют на выбор УР не напрямую, а опосредованно: через влияние геометрии на скорость и качество синтезируемой проблемно-ориентированной СМС (проблемно-ориентированный анализ которой, в конечном итоге, и определяет выбор УР). При решении подобных ПРЗ процесс выработки УР очень чувствителен к качеству синтезированной СМС. Из-за этого синтез СМС должен опираться на геометрический анализ не ВМС, непосредственно синтезированной из ПМС, а на анализ ПЗМГ, которые:

- 1) не противоречат данным видеомониторинга сцены (т.е. ПМС и ВМС);
- 2) максимально удовлетворяют требованиям решаемой ПРЗ. Преобразование ВМС в такую ПЗМГ основывается на априорных знаниях о:
 - геометрических характеристиках 3D-объектов (ПЗО), объявленных в условиях ПРЗ проблемно-значимыми и обнаружение которых в E_S способно кардинально повлиять на выбор будущего поведения АР (через выбор УР);
 - геометрических и физических свойствах среды, окружающей АР;
 - результатах сканирования E_S видеодатчиками других роботов.

Из-за недостатка у СКЗ АР времени и вычислительных ресурсов число ПЗМГ, автоматически рассматриваемых СКЗ АР при поиске АМГ (самой актуальной из рассматриваемых ПЗМГ), всегда ограничено. Поэтому ПЗМГ, участвующие в отборе АМГ, должны априорно обладать большой прикладной значимостью, учитывающей как число ПЗО, предварительно

обнаруженных СКЗ АР и вошедших в данную ПЗМГ, так и проблемно-значимый вес этих ПЗО (характеризующий степень влияния факта обнаружения данного ПЗО внутри исследуемой ВМС на выбор будущего поведения АР).

Для отбора указанных ПЗМГ исходные условия ПРЗ должны содержать описание всех типов ПЗО решаемой ПРЗ. Описание типа ПЗО должно включать: наименование типа ПЗО; математическое описание геометрической модели ПЗО этого типа; диапазон допустимых координат положения ПЗО в F_S ; проблемно-значимый вес ПЗО данного типа. Для синтеза каждой (j -й) ПЗМГ выполняется геометрическое распознавание всех типов ПЗО внутри исследуемой ВМС с одновременным расчетом значений Λ_j и Ψ_j .

Распознавание ПЗО для повышения его скорости и качества следует осуществлять многоитерационным методом ВЗС, реализуемым на базе воксельной АПТОС [4], например, с применением ракурсных воксельных моделей ПЗО [2, 4] (рис. 3, а, см. третью сторону обложки), выполняющих функцию виртуальных зондов, а роль зондируемой сцены выполняет ВМС (рис. 3, б, в). На нулевой итерации используются предельно грубые воксельные модели всех ПЗО по всему диапазону разрешенных 3D-углов поворота этих ПЗО. Максимальная скорость зондирования достигается в ВВ, когда разрешающая способность воксельной модели зонда совпадает с разрешающей способностью процессорной матрицы $q^2 \times q^2 \times q^2$ ВВ. В связи с этим на начальном (нулевом) этапе итерации разрешение воксельной модели зонда не должно превышать разрешения $q^2 \times q^2 \times q^2$. С каждым последующим этапом зондирования число ПЗО и диапазон возможных их пространственных положений внутри F_S (допущенных к участию на следующих этапах зондирования) сокращается. Иными словами, целью k -й итерации является снижение числа ЭАЗ, требующихся для зондирования на $(k + 1)$ -м этапе итерации с применением воксельных моделей ПЗО более высокого разрешения.

Для каждого ПЗО i -го типа отмечаются все случаи их обнаружения внутри F_S (когда вероятность распознавания $V_{iu} > V_{\text{порог}}$, где u — номер обнаруженного ПЗО i -го типа). Линейные и угловые координаты всех ПЗО i -го типа внутри воксельной модели F_S и их значения V_{iu} запоминаются. Далее строится объектная воксельная геометрическая модель-гипотеза сцены (ОМГ_{id}, где d — номер такой объектной модели-гипотезы), состоящая только из взаимно непересекающихся ПЗО i -го типа. Затем все

подобные ОМГ, содержащие все опознанные типы ПЗО, характерные для решаемой ПРЗ, накладываются друг на друга и анализируются на пересеканность. По результатам этого наложения отбираются ПЗМГ, обладающие самой высокой проблемной значимостью (Ψ) и самой высокой точностью (Λ) представления видимой части E_S с помощью каждой из отобранных ПЗМГ. Расчет значений Ψ и Λ осуществляется средствами ВВ с высокой степенью параллелизации.

Заключение

Используя в СКЗ АР воксельную АПТОС для выполнения геометрического анализа содержимого 3D-сцен и опираясь на описанный критерий качества такого анализа, можно достичь рекордно высокой адаптивности АР. Это позволит резко поднять уровень автоматизации и производительности труда в различных областях человеческой деятельности за счет расширения функциональных возможностей АР.

Список литературы

1. Казьмин В. Н., Носков В. П. Выделение геометрических и семантических объектов в дальнометрических изображениях для навигации роботов и реконструкции внешней среды // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. С. 72.
2. Бимаков Е. В., Бимаков В. А. Устройство управления высокоадаптивным автономным мобильным роботом/ Патент РФ № 2705049. 2019. Бюл. № 31.
3. Бимаков В. А., Бимаков Е. В. Применение воксельной аппаратно-программной технологии обработки сцен для повышения адаптивности автономных мобильных роботов. Доклад на семинаре "Проблемы управления автономными РК" ИПУ РАН, 19.06.2017. URL: <http://www.ipu.ru/smart>
4. Бимаков Е. В. Метод виртуального зондирования сцены на базе воксельной технологии обработки сцен // Информационные технологии. 2016. № 11. С. 827—835.
5. Kenichi Kanatani, Yasuyuki Sugaya, Yasushi Kanazawa. Guide to 3D Vision Computation: Geometric Analysis and Implementation (Advances in Computer Vision and Pattern Recognition). 2016. 319 p. URL: <http://www.springer.com/book/9783319484921>.
6. Боресков А. В., Харламов А. А. Основы работы с технологией CUDA. М.: ДМК-Пресс, 2010. 232 с.
7. Hermann A., Drews F. GPU based Voxel-Collision-Detection for Robot Motion Planning // IAS-13. Padova. 2014. URL: <http://www.gpu-voxels.org>.
8. Бимаков В. А. Высокоскоростная обработка пиксельных моделей для решения задач управления автономным роботом // Мехатроника, автоматизация, управление. Приложение. 2008. № 12. С. 2—8.
9. Бимаков В. А. Высокоскоростная обработка n -мерных пиксельных гео-метрических моделей // Информационные технологии. 2009. № 3. С. 29—36.

Improving the Speed and Quality of Analysis of 3D-Scenes Scanned by Sensors of an Autonomous Robot

The issues of construction and functioning of computer vision systems (CVS) intended for use in control systems of super-adaptive autonomous robots (ARCS) are considered. The concept of the quality of the geometric analysis of the scene performed in the CVS of AR is defined. A generalized algorithm for the functioning of the CVS of AR is presented, based on the use of ultra-high-speed hardware-software technology for scene processing (the so-called voxel HSTPS). On the example of the implementation of individual procedures of this algorithm, the advantages of using voxel HSTPS to build super-adaptive ARs based on it based on a geometrically complex and geometrically rapidly changing external environment are demonstrated.

Keywords: computer vision, adaptability of autonomous robots, computing technologies for processing 3D-scenes, geometric primitives, geometric models of 3D-objects, recognition of 3D-objects

DOI: 10.17587/it.26.472-481

References

1. Kazmin V. N., Noskov V. P. Highlighting geometric and semantic objects in long-range images for navigating robots and reconstructing the external environment, *News of the Southern Federal University. Technical science*, 2015, pp. 71–83 (in Russian).
2. Bimakov E. V., Bimakov V. A. Highly adaptive autonomous mobile robot control device No. 2705049, 2019, Bull. no. 31 (in Russian).
3. Bimakov V. A., Bimakov E. V. Using voxel technology for scene processing to increase the adaptability of autonomous mobile robots, *The report at the seminar "Problems to control the autonomous robotic complexes"*. Institute of Control Sciences RAS, 19.06.2017, available at: <http://www.ipu.ru/smart> (in Russian).
4. Bimakov E. V. Method of virtual probing of scene on base the voxel technology of scene processing, *Informazionnye Tekhnologii*, 2016, no. 11, pp. 827–835 (in Russian).

5. Kenichi Kanatani, Yasuyuki Sugaya, Yasushi Kanazawa. Guide to 3D Vision Computation: Geometric Analysis and Implementation (Advances in Computer Vision and Pattern Recognition), 2016, 319 p., available at: <http://www.springer.com/book/9783319484921>.
6. Borekov A. V., Kharlamov A. A. Basics of working with CUDA technology, Moscow, DMK-Press, 2010, 232 p. (in Russian).
7. Hermann A., Drews F. GPU based Voxel-Collision-Detection for Robot Motion Planning, *IAS-13*, Padova, 2014, available at: <http://www.gpu-voxels.org/>.
8. Bimakov V. A. High-speed processing of pixel models for solving tasks of controlling an autonomous robot, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, Prilogenie*, 2008, no. 12, pp. 2–8 (in Russian).
9. Bimakov V. A. High-speed processing of geometric models consisting of n-dimensional pixels, *Informazionnye Tekhnologii*, 2009, no. 3, pp. 29–36 (in Russian).

1D-АБИ — Одномерное адресуемое бинарное изображение (двоичное число)
2D-АБИ — Двумерное адресуемое бинарное изображение
3D-АБИ — Трехмерное адресуемое бинарное изображение
АПТОС — Аппаратно-программная технология обработки сцен
АМГ — Актуальная модель-гипотеза содержимого исследуемой сцены
АР — Автономный робот
ВВ — Воксельный вычислитель
ВЗС — Виртуальное зондирование исследуемой сцены
ВМС — Воксельная геометрическая модель содержимого сцены
ГАМС — Главная анализируемая проблемно-ориентированная модель сцены
ГМС — Геометрическая модель содержимого сцены
ГП — Геометрический примитив
ДО — Дискретизирующее отображение, моделирующее геометрическое преобразование
ПВ — Программируемый вычислитель
ПРЗ — Прикладная робототехническая задача, решаемая АР

СКЗ АР — Система компьютерного зрения автономного робота
СМС — Семантическая модель содержимого исследуемой сцены
СУ АР — Система управления автономного робота
ОПОС — Основные операции и процедуры обработки сцен
ПЗМГ — Проблемно-значимая геометрическая модель-гипотеза
ПЗО — Проблемно-значимый объект решаемой ПРЗ
ПМС — Параметрическая модель содержимого исследуемой сцены
ТОС — Технология обработки сцен
УР — Управленческое решение, принимаемое СУ АР и определяющее будущее поведение АР до окончания текущего УЦ АР
УЦ АР — Управляющий цикл автономного робота
ФЗ — Функция зондирования
ЭАЗ — Элементарный акт зондирования геометрической модели сцены
ЭОС — Элементарная область сканирования исследуемой сцены

М. Е. Вайндорф-Сысоева, д-р пед. наук, проф., e-mail: mageva@yandex.ru,
Е. О. Воробчикова, магистрант, e-mail: vorobchikova_eo@inbox.ru,
Московский педагогический государственный университет

Модель организации профессиональной педагогической поддержки преподавателя при использовании электронных образовательных ресурсов

Задачей данного исследования стала разработка системы профессиональной педагогической поддержки преподавателя в использовании электронных образовательных ресурсов в учебном процессе. В статье дается определение термина "профессиональная педагогическая поддержка преподавателя". Кроме того, описана модель профессиональной педагогической поддержки преподавателя в использовании электронных образовательных ресурсов, выделены основные дидактические задачи, которые могут быть решены с применением электронных образовательных ресурсов. Описанная модель позволит педагогам самостоятельно создавать ресурсы, наиболее эффективно и осознанно внедрять электронные технологии в образовательный процесс.

Ключевые слова: профессиональная педагогическая поддержка, самообразование, электронные образовательные ресурсы, электронные образовательные технологии, электронное обучение

В начале XX века обновление знаний происходило каждые 20...30 лет, поэтому при традиционной системе обучения общество не ощущало недостатка актуальных знаний. В настоящий момент обновление знаний происходит каждые 5 лет, поэтому остро встают проблемы функциональной неграмотности, возникает дефицит экономических, правовых, технических, социально-педагогических, экологических и иных знаний. Обновление содержания формального образования идет при этом значительно медленнее. Поэтому особо остро встает вопрос о профессиональной поддержке, особенно поддержки педагогических кадров.

Кроме того, одним из наиболее стремительно развивающихся направлений является электронное обучение, и вопрос актуального использования электронных образовательных ресурсов (ЭОР) в профессиональной деятельности педагога является очень важным.

Задачей данного исследования стала разработка модели профессиональной педагогической поддержки преподавателя при использовании ЭОР в образовательном процессе.

Стоит отметить, что термин "педагогическая поддержка" чаще всего употребляется применительно к обучающимся при формировании той или иной компетенции. Такие авторы, как О. С. Газман, Н. Л. Кучеренко, Э. П. Бакшеева, М. В. Шинкорук, И. А. Славина, Ю. В. Стафеева, Б. Е. Фишман, Т. Д. Молодцова, исследовали вопрос педагогической поддержки именно с этой точки зрения.

Под профессиональной педагогической поддержкой преподавателя при использовании ЭОР в образовательном процессе понимается система взаимодействия участников образовательного процесса, направленная на решение проблем, связанных с освоением и использованием ЭОР, включающая в себя диагностическое, просветительское, консультативное и другие направления профессиональной деятельности.

Наиболее целесообразно для организации деятельности по педагогической поддержке педагогов образовательных организаций использовать или частично задействовать пространство сети Интернет. Основные направления, по которым может быть реализована профессиональная поддержка преподавателя, следующие:

- проведение мониторинга потребностей преподавателей для актуализации наиболее важных тем и проблем, стимулирования специалистов к изучению новых инструментов;
- разработка и реализация различных видов просветительской деятельности в рамках инновационной системы (например, лекции, мастер-классы, в том числе в режиме онлайн);
- организация обучения (дистанционные и интегрированные курсы повышения квалификации (базовые, модульные, предметные));
- реализация форм виртуальной (дистанционной) педагогической поддержки (интернет-конференции, онлайн-дискуссии,

виртуальные выставки, сетевые конкурсы учителей, методическое сопровождение и консультирование, экспертная оценка работ специалистов, в том числе молодых, группами опытных учителей).

К основным функциям профессиональной поддержки педагогов отнесены: проведение семинаров и мастер-классов, лекций и экспертиз, обсуждение и разработка системообразующих документов; поддержание программного обеспечения в актуальном состоянии; сбор и анализ обратной связи пользователей по использованию того или иного продукта, разработка рекомендаций по совершенствованию системы взаимодействия; организация помощи и взаимопомощи в дальнейшей работе педагога.

Для выявления наиболее актуальных методов для разработки модели профессиональной педагогической поддержки преподавателя в использовании ЭОР был проведен опрос [1] по применению ЭОР на уроках. Большинство опрошенных определяют свой уровень владения персональным компьютером как очень высокий: могут научить других или интуитивно разобраться с незнакомым инструментом 57,8 %; также 31,6 % считают возможным разобраться в новой для себя программе, но в случае наличия подробной инструкции или грамотного наставника.

В процессе исследования были определены дидактические задачи, требующие решения с использованием ЭОР. Выделим некоторые из них:

- мотивация обучающихся к деятельности;
- наглядное представление изучаемого материала;
- контроль знаний (сокращение затрачиваемого времени);
- целеполагание;
- выстраивание индивидуальной траектории;
- возможность "оживить" и разнообразить урок;
- поиск необходимой информации в процессе изучения темы;
- возможность более глубоко погрузиться в предмет (например, общение с носителем языка или изучение микромира).

Кроме того, респонденты выделяли ряд организационных задач, которые бы хотели решить за счет использования ЭОР:

- автоматизация образовательного процесса;
- экономия времени на организационных вопросах (например, коммуникация между участниками образовательного процесса или уменьшение времени на подготовку к занятиям).

На основании проведенного опроса сделано заключение, что система профессиональной педагогической поддержки преподавателя необходима как в глобальной (на федеральном, региональном, районном уровнях), так и локальной (на базе педагогического сообщества, образовательной организации, методического объединения учителей-предметников) формах.

Мы выделили три основные составляющие эффективной работы педагога с использованием ЭОР:

1. Актуализация знаний о разнообразии инструментов ЭОР.

2. Знание механизма работы инструментов по созданию ЭОР.

3. Умение внедрить ЭОР в профессиональную деятельность.

На основании этого была разработана модель профессиональной педагогической поддержки преподавателя в использовании ЭОР, представленная на рис. 1.

В основе системы профессиональной педагогической поддержки преподавателя в использовании ЭОР лежат три компонента:

1. Просвещение: знание педагога, *чем* можно создать тот или иной ЭОР. Этот этап реализуется за счет участия педагога в различных педагогических сообществах, в том числе в социальных сетях, за счет саморазвития (изучение статей и профессиональной литературы), курсов повышения квалификации, функционала мессенджеров, например, создания чат-бота.

2. Изучение механизма работы того или иного инструмента: *как* преподаватель может создать или редактировать ЭОР? На этот во-



Рис. 1. Модель профессиональной педагогической поддержки преподавателя в использовании ЭОР

прос может ответить сам педагог после обучения на курсах.

3. Грамотное внедрение ЭОР в свою профессиональную деятельность: *куда и каким образом* внедрять и на каком этапе урока какой вид ЭОР будет наиболее уместен? При решении данного вопроса полезными будут коммуникация с коллегами, обмен опытом.

Все три компонента находятся под определенным воздействием, которое определяет целесообразность и необходимость использования ЭОР в целом.

В первую очередь, педагог должен понимать, *зачем* ему применять ЭОР на своих занятиях. Какие основные дидактические задачи они решают, почему применяется тот или иной вид ЭОР, как в вопросе использования правильно отталкиваться от материально-технических условий своей образовательной организации и др.?

Ответ на вопрос *"для чего?"* диктует глобализация и развитие науки. Какие новые задачи появляются, которые уже нельзя решать по-старому? Основным посылом, диктующим необходимость использования электронного устройства не как отдельного элемента (например, на занятиях информатикой для изучения отдельных функций персонального компьютера), а как инструмента для познания мира в целом, является именно глобализация.

Рефлексия, или оценка эффективности использования ЭОР, грамотное выстраивание процесса обучения с использованием электронных технологий, ответ на вопрос, *почему так, а не иначе*, должны сопровождать учи-

теля не только на финише (окончании курса, учебного года и т.д.), но и на протяжении всего процесса работы. Это позволит внести определенные коррективы в образовательный процесс и заменить ЭОР на более уместный и эффективный в конкретной ситуации.

Реализация данной модели может быть наиболее успешна, на наш взгляд, в онлайн-обучении. По данным О. Ю. Ангеловой онлайн-обучение обеспечивает: широкий охват обучающихся и доступность образования; возможность персонализировать учебный процесс и адаптировать его к потребностям слушателей; возможность онлайн-обработки результатов и процесса обучения, создание на основе полученных данных рейтинговых списков слушателей; обширный перечень технических возможностей для визуализации контента [2].

Кроме того, были определены четыре основных уровня готовности (рис. 2) педагогов к разработке и внедрению ЭОР в профессиональную деятельность:

1. Начальный (знаниевый) (знание об информационно-компьютерных технологиях, отдельных инструментах, но не использование их или невозможность их освоения).

2. Репродуктивный (освоение инструментов и новых для себя инструментов с использованием инструкции или посторонней помощи, неумение сопоставить возможности ЭОР для решения необходимых дидактических задач на учебном занятии).

3. Исследовательский (самостоятельное освоение новых инструментов, проектирование и создание ЭОР для внедрения их в профессиональную деятельность).

4. Творческий (готовность не только к освоению и правильному применению ЭОР в профессиональной деятельности, но и к трансляции личного опыта и возможности быть наставником для педагогов, предыдущих уровней готовности).

На каждом из уровней осуществляется профессиональная педагогическая поддержка преподавателя, которая заключается в проведении обучения (разной степени погруженности в материал), консультирования, просвещения, участия в мероприятиях, ком-



Рис. 2. Циклическая модель профессиональной педагогической поддержки преподавателя на различных уровнях готовности к использованию ЭОР

муникации в социальных сетях. Кроме того, стоит отметить, что переход на следующие уровни готовности, как и поддержка данного процесса, носят циклический характер. И, достигая четвертого уровня готовности, педагог не просто становится наставником, который способен делиться актуальной информацией и самостоятельно осуществлять поддержку, но и максимально вовлекается в процесс и нуждается в постоянном обновлении и трансформации собственных знаний.

Одним из направлений онлайн-взаимодействия можно назвать виртуального собеседника — чат-бота. В описанной модели (см. рис. 1) он выполняет просветительскую функцию.

История виртуальных собеседников, которую описывает Л. Е. Малыгина [3], развивается с 1950 г. Отправным пунктом стало появление теста Тьюринга, который позволил определить способность машины мыслить. В 1961 г. были созданы первые виртуальный голосовой помощник Shoebox от IBM и виртуальный собеседник Элиза (Eliza). В 1988 г. появился чат-бот Джаббервоки (Jabberwacky) по кличке "Бот-Болтун", для общения с пользователем. В 1990 г. впервые была учреждена премия для виртуальных собеседников - премия Лебнера (Loebner Prize).

В 1995 г. был создан чат-бот на основе обработки естественного языка - A.L.I.C.E.. Компания Apple в 2010 г. представила бот Сири (Siri) для операционной системы iOS.

В 2014 г. на рынке чат-ботов появляются все более совершенные новинки: виртуальные помощники Алекса и Кортана от Amazon и Microsoft. В 2015 г. создается API для разработчиков ботов в Facebook Messenger. В 2017 г. появляются Бокси (Boxby) от Samsung и Алиса от Яндекса, а в мае 2018 г. — технология для добавления человеческого голоса виртуальному ассистенту Google Assistant.

Рассмотрим три основных описанных бота, которые являются голосовыми помощниками. В проанализированных источниках описания и сравнительных характеристик чат-ботов представлено не было. Мы провели сравнение на основании официальных сайтов (Amazon, Яндекс, Google) и представили его в таблице.

"Чат-бот — это компьютерная программа для моделирования интерактивных разговоров, основанная на технологии искусственного интеллекта. Иначе говоря, это автоматизированные ответы на запросы пользователей", как отмечает в своей работе О. В. Чечков [4].

Само понятие "виртуальный собеседник", как описывает Л. Е. Малыгина [3], возник еще

Сравнение голосовых помощников

Характеристики	Голосовой помощник Alexa Amazon Echo	Голосовой помощник Алиса	Виртуальный ассистент Google Assistant
Производитель	Amazon	Яндекс	Google
Сайт производителя	https://www.amazon.com	https://alice.yandex.ru	https://assistant.google.com
Год выпуска	2017	2017	2016, 2018 (добавление распознавания голоса)
Доступность	"Умный" динамик. Только на территории США	На смартфонах, персональных компьютерах, Яндекс-станция, Яндекс-модуль, автомобиль	На смартфонах с операционными системами IOS и Android
Безопасность	Возможность отключить микрофон, запись голоса пользователя происходит только в режиме работы устройства	Возможность управлять сохранением истории поиска и голосового управления, запрет передачи данных с устройств	Возможность управлять сохранением истории поиска и голосового управления, запрет передачи данных с устройств
Функционал	Воспроизводит музыку, формирует списки задач, устанавливает будильники, таймер, сообщает погоду, информацию о пробках. Позволяет управлять умным домом	Взаимодействие с приложениями Яндекса: поиск, браузер, навигатор. Возможно управление умным домом, включение музыки, поиск по фотографии, вызов такси, построение маршрута, поиск локаций, конвертация валюты, совместные игры, узнавание погоды, наличия пробок и т.д.	Взаимодействует с приложениями телефона (будильник, календарь и др.), продуктами Google
Каналы взаимодействия	Аудио	Аудио и текст	Аудио и текст

в 1994 г., но лишь спустя 20 лет эта технология стала трендом. В 2019 г. существуют помощники для игры в шахматы, для беседы, обсуждения музыки, заказа товаров. Все более популярными становятся обучающие чат-боты. Они позволяют освоить дистанционный курс, изучать необходимые материалы, сдавать экзамены и тесты. Основное пространство для создания чат-ботов — мессенджеры (Например, Viber, Telegram, Facebook Messenger), а также чаты на веб-сайтах.

В рамках реализации модели профессиональной педагогической поддержки преподавателя одним из механизмов, реализующих просветительскую функцию, выполняет чат-бот, созданный в приложении Telegram.

При обилии действующих онлайн-сервисов в сегменте электронного обучения чат-боты занимают особое место, так как могут сопровождать каждого слушателя индивидуально, в соответствии с его уровнем и выбранным темпом освоения материала. Тем самым обучение и сам контент становится доступным практически для любого человека, находящегося в сети.

По данным ВЦИОМ на сентябрь 2019 г. 68 % опрошенных ежедневно используют сеть Интернет. В связи с этим создание бота на одной из мобильных платформ является целесообразным и актуальным для актуализации знаний педагогов. Во-первых, это позволит в потоке ежедневных дел узнавать актуальную информацию для дальнейшего профессионального развития. Во-вторых, даст возможность использовать смартфон не только как средство коммуникации, но и как инструмент для самообразования.

Бот напоминает пользователю о необходимых действиях: освежить изученный материал, выполнить задание и др. Бот круглосуточно отвечает на вопросы пользователя по запросу. Кроме того, бот позволяет собирать необходимую информацию, т. е. обратную связь от пользователя. Это может понадобиться для оценки эффективности работы помощника или возможность оценить успехи самого пользователя.

Мобильное восприятие информации, уменьшение периодов концентрации внимания и отсутствие времени на образование резко снижают вовлеченность в самообразование и, как следствие, снижают эффективность профессиональной деятельности. Таким образом, обучение в мессенджере частично решает эти проблемы. Так, например, учиться в мессенджере можно в удобное время, интерфейс платформы привычный и удобный для поль-

зователя, узнавание материала происходит в режиме диалога.

Нами был создан чат-бот @help_teachers_bot для помощи в выборе и освоении инструментов для создания электронных образовательных ресурсов (ЭОР). Он включает в себя следующие разделы:

- "Что такое цифровые образовательные ресурсы" и "Что такое ЭОР".
- Разновидности ЭОР:
 - визуализация информации;
 - системы опроса и тестирования;
 - интерактивные задания;
 - системы управления обучением (lms);
 - использование облачных технологий;
 - геймификация в образовании;
 - социальные сети в образовательном процессе;
 - использование на уроках vr и ar.

Каждый из разделов включает в себя перечень актуальных инструментов для создания ЭОР. Для сбора обратной связи в каждом разделе пользователю предлагается ответить на вопрос (открытый или закрытый) и поделиться своим опытом по данному направлению.

Созданный бот отвечает основным требованиям такого вида помощника:

- оперативность в поиске информации;
- обратная связь;
- доступность взаимодействия;
- сбор статистических данных.

В дальнейшем описанный продукт может быть дополнен возможностью задавать открытые вопросы пользователям, т. е. имеется так называемое "обучение бота".

Таким образом, основная задача бота — вовлечь людей в обучение, в познание предмета, ориентируясь на их естественное взаимодействие с мобильным устройством, используя быструю и недорогую технологию.

Совершенствование качества профессиональной деятельности педагогов, соответствующего запросам современной жизни, — необходимое условие развития системы образования. На фоне повышенного общественного внимания к этой проблеме особую актуальность приобретает вопрос о способах, инструментах мотивации совершенствования качества профессиональной деятельности педагогов. Поэтому необходимо определить систему стимулирования для сохранения педагогического контингента в образовательной организации и привлечения новых кадров, которые смогут эффективно работать. Иными словами, нужна мотивация педагогических работ-

ников к деятельности, ведущей к повышению качества образовательного процесса, и создание условий для удовлетворения их мотивов и потребностей. Описанная модель может быть реализована в образовательной организации среднего, среднего профессионального и высшего профессионального образования. Она позволит педагогам самостоятельно создавать ресурсы, наиболее эффективно и осознанно внедрять электронные технологии в образовательный процесс.

Список литературы

1. **Воробчикова Е. О.** Особенности построения модели профессиональной педагогической поддержки педагога в

условиях глобальных изменений // Научный поиск. 2019. № 2(32). С. 25—28.

2. **Ангелова О. Ю., Подольская Т. О.** Тенденции рынка дистанционного образования в России // Концепт. 2016. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tendentsii-rynka-distantsionnogo-obrazovaniya-v-rossii> (дата обращения: 20.08.2019).

3. **Малыгина Л. Е.** "Виртуальные собеседники": перспективы развития телевизионного промодискурса // Верхневолжский филологический вестник. 2018. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/virtualnye-sobesedniki-perspektivy-razvitiya-televizionnogo-promodiskursa> (дата обращения: 05.08.2019).

4. **Чечков О. В.** Обзор образовательных технологий в практике преподавателя учреждения высшего медицинского образования // Актуальные проблемы медицины: материалы ежегодной итоговой научно-практической конференции (25—26 января 2018 г.) / отв. ред. В. А. Снежицкий. Гродно: ГрГМУ, 2018. С. 819—823.

**M. E. Vayndorf-Sysoeva, D.Sc., Professor, mageva@yandex.ru,
E. O. Vorobchikova, Master Student, vorobchikova_eo@inbox.ru,
Moscow State Pedagogical University, Moscow, Russian Federation**

Organizational Model of Professional Pedagogical Support of the Teacher in the Use of Electronic Educational Resources

The goal of the study was to develop a system of professional pedagogical support for teachers in the use of electronic educational resources in the educational process. In the paper we defined the term "professional pedagogical support of a teacher", described the model of professional pedagogical support of the teacher in use of electronic educational resources and determined the main didactic tasks which can be solved with application of electronic educational resources. The described model will allow teachers to create their own resources and most effectively and consciously implement electronic technologies in the educational process.

Keywords: professional pedagogical support of a teacher, self-education, e-learning resources, e-learning technologies, e-learning

DOI: 10.17587/it.26.482-487

References

1. **Vorobchikova E. O.** Features of building a model of professional support of a teacher in the conditions of global changes, *Nauchnij Poisk*, 2019, no. 2(32), pp. 25—28 (in Russian).

2. **Angelova O. U., Podolskaja T. O.** Distance education market trends in Russia, *Koncept*, 2016, no. 2, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/tendentsii-rynka-distantsionnogo-obrazovaniya-v-rossii> (date of the application: 20.08.2019) (in Russian).

3. **Maligina L. E.** Virtual Interlocutors: Prospects for the Development of Television Promotional Discourse, *Verhnevoljskiy Filologicheskii Vestnik*, 2018, no. 4, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/virtualnye-sobesedniki-perspektivy-razvitiya-televizionnogo-promodiskursa> (date of the application: 05.08.2019) (in Russian).

4. **Chechkov O. V.** Overview of educational technologies in the practice of a teacher of a higher medical education institution, *Aktualnie problemi medicini: materialy ejegodnoyi itogovoi nauchno-prakticheskoy konferencii* (25-26 yanvarya 2018), Grodno, Publishing house of GrGMU, 2018, pp. 819—823 (in Russian).

П. С. Романов, д-р техн. наук, проф., e-mail: romanov_p_s@mail.ru,
Коломенский институт (филиал) ФГБОУ ВО "Московский политехнический университет", г. Коломна,
И. П. Романова, канд. техн. наук, доц., e-mail: i-p-romanova@yandex.ru,
ФГБОУ ВО "Московский государственный университет технологий и управления
имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет)", Москва

Методический аппарат принятия решения интеллектуальной системой управления мобильного робота при сборе ягод

Рассмотрена одна из задач управления интеллектуальным мобильным роботом сельскохозяйственного назначения — задача выбора порядка применения робота для сбора ягоды. Разработан методический аппарат выбора принятия решения интеллектуальной системой управления мобильного робота при лингвистической оценке вариантов решения по порядку применения робота для сбора ягоды. Данный аппарат может быть реализован при разработке программного обеспечения не только при управлении интеллектуальными мобильными роботами сбора ягоды, но и при управлении роботами иного назначения.

Ключевые слова: мобильный робот, искусственный интеллект, интеллектуальная система управления, принятие решений, лингвистическая оценка вариантов решения, метод установления отношения порядка на нечетких оценках, сбор ягоды

Введение

Мобильная робототехника в настоящее время представляет эффективный инструмент решения задач, где существует угроза жизни и здоровью человека, присутствуют экономические и технологические ограничения. Также мобильные роботы применяют и в обычных условиях для выполнения тяжелых или длительных монотонных работ, а также в качестве внутрицехового транспорта, на автоматизированных складах, при проведении земляных работ [1—6].

Сегодня с помощью мобильных роботов в сельском хозяйстве решается ряд задач: вождение тракторов, комбайнов и другой сельхозтехники; применение в теплицах для работ по подготовке почвы, высеву семян, опрыскиванию химикатами, сбору готовой продукции (рассады, овощей, фруктов), ее сортировке и укладке в тару; разгрузка, погрузка, хранение и распределение сельхозпродукции на складах, в пунктах агропромышленной логистики [1, 7].

При создании мобильных роботов активно применяются технологии искусственного интеллекта (ИИ): нечеткая логика, искусственные нейронные и нейронечеткие сети, искусственные иммунные системы, генетические алгоритмы, роевой интеллект. Такие роботы называют интеллектуальными роботами. В них реализуются следующие функции: обработка сенсорной информации; оценка внешней ситуации; принятие адекватных решений по выбору целей поведения, планированию путей их дости-

жения; реализация этих планов путем управления движением робота [1, 2, 6—14].

Если беспилотные комбайны уже эффективно убирают урожай картофеля и зерновых, то с ягодами, овощами и фруктами ситуация более сложная. Необходимо научить машины бережно и без повреждений кожуры собирать такой урожай. Сбор урожая ягод садовой земляники — самый трудоемкий процесс в общей технологии возделывания этой ценной культуры. Сегодня производительность труда при ручном сборе ягод невелика — от 4 до 15 кг/ч; для крупных ягод со средним весом 15 г — 13 кг/ч, для ягод со средним весом 7 г — 7 кг/ч. На уборку урожая с одной сотки планируют от 7 до 20 чел/ч. На крупных плантациях необходимо заранее знать, на какое количество рабочей силы можно рассчитывать на пиковые 2...3 недели в июне—июле. Как свидетельствует зарубежный и отечественный опыт, механизация этого процесса возможна [15—17].

Несколько компаний осуществляют поиск решения данной задачи. Так, испанская компания Agrobot предлагает для ее решения опытный робот SW6010. Он работает полностью в автономном режиме и способен самостоятельно ориентироваться в пространстве. Машина в режиме реального времени использует технологии искусственного интеллекта для оценки зрелости ягод. Робот также оснащен сенсорами для оценки цвета плода и его товарного вида. Сенсоры проводят анализ ягод и записывают информацию о каждом плоде.

Когда робот завершает уборку ряда, он останавливается и передает данные оператору. За три дня один робот Agrobot может собрать садовую землянику с 800 соток [18].

Необходимо уточнить, что указанный робот тестировался на плантации в Калифорнии в идеальных для выращивания и сбора ягод условиях. Климат в центральной России является умеренно-континентальным. Лето в средней полосе России теплое, умеренно влажное, с преобладанием переменной облачной погоды. Поэтому часто сбор ягод на полях с открытым грунтом проходит в неблагоприятных условиях, обусловленных, в первую очередь, наличием дождливых дней в период сбора ягод. Кроме того, сбор ягод ограничен сроком их созревания, который не превышает нескольких недель. Решение прикладных задач, связанных со сбором ягод автономным роботом в таких условиях, относят к задачам с низкой степенью организованности внешней среды и недостаточной априорной информации о ней.

Таким образом, имеет место неопределенность и нечеткость задач, которые должны быть решены системой управления мобильным роботом, предназначенным для сбора ягод на полях с открытым грунтом. Это предполагает необходимость применения для управления роботом технологий ИИ, т.е. он должен оснащаться интеллектуальной системой управления (ИСУ).

Цель данного исследования — разработка методического аппарата принятия решения ИСУ мобильного робота по порядку его применения для сбора ягод, когда варианты решений оцениваются лингвистически.

Постановка задачи. В дождливую погоду сбор ягод обычно не проводят, что снижает массу собранного урожая и, соответственно, прибыль от его продажи. Но надо учитывать, что при сборе ягод на 1 день позже их созревания в дождливую погоду, теряется до 30 % (в результате порчи ягод из-за серой гнили, слизней, лягушек), на 2 дня позже — до 60 % урожая. Кроме того, ягода переходит из пересылочной спелости в полную [16].

В сухую и теплую погоду можно собрать интеллектуальным мобильным роботом все ягоды. Но если нет возможности собрать все ягоды из-за прогнозируемого дождя, то можно собрать наиболее крупные ягоды со всей плантации. Выигрыш состоит в том, что крупные стандартные ягоды, пригодные для потребления в свежем виде, стоят примерно в 4 раза дороже ягод, идущих на переработку. Проигрыш заключается в том, что не собранная вовремя ягода сгниет и может быть съедена вредителями.

Надо учитывать, что после дождя должно пройти определенное время для того, чтобы ягода высохла. Сбор мокрой ягоды снижает ее качество.

Зная прогноз погоды на определенный период времени, ИСУ робота должна оценить время, которое у робота есть на сбор ягод до начала дождя, и длительность дождливой погоды. Затем принять один из вариантов решения:

- собирать всю ягоду с какой-то части своего участка за доступное время, если дождя не будет и сбор можно будет продолжить на следующий день;
- собирать только лучшие крупные ягоды, если дождь будет затяжной и ягоды будут нельзя собирать несколько дней;
- собирать крупные и средние ягоды, если дождь будет идти до половины суток или одни сутки, а потом погода будет сухая и солнечная и ягода высохнет. За это время сгниет и будет съедено 10 % урожая ягод.

Кроме погодных условий, прибыль от собранной ягоды зависит от урожайности ягод на данной плантации. При известной урожайности выгоднее собирать, прежде всего, крупную ягоду, так как стоимость крупных ягод примерно в 1,5 раза больше, чем средних и в 4 раза больше, чем мелких, идущих на переработку для консервного производства [16, 17].

Погодные условия оказывают влияние и на скорость созревания ягод садовой земляники. Если наблюдается продолжительный период сухой и теплой погоды, то это идеальные условия для сбора ягоды. Но если стоит солнечная сухая и жаркая погода, то ягода созревает очень быстро, и сбор ягод надо проводить оперативно, чтобы ягода не пропала. Сухая погода уменьшает риск гниения ягод и поедания ее слизнями.

Таким образом, при известной урожайности данного сорта садовой земляники прибыль от собранной ягоды зависит, прежде всего, от погодных условий и продолжительности хорошей погоды, от оперативности сбора ягоды, от массы собираемой ягоды. Также прибыль будет зависеть от технических характеристик мобильного робота, прежде всего, его производительности. Например, как указывалось ранее, один робот Agrobot может собрать садовую землянику с 800 соток в хороших условиях за 3 дня. Надо отметить, что производительность может меняться в зависимости от места нахождения участка, сорта ягоды, его урожайности в этот год и т.п. Все это влияет на порядок применения мобильного робота при сборе ягоды.

Задачу можно сформулировать следующим образом: интеллектуальной системе управления мобильного робота необходимо найти

наилучший вариант порядка его применения для сбора ягод, обеспечивающий наибольшую прибыль от этого сбора.

При этом мобильный робот должен быть оснащен трехуровневой интеллектуальной системой управления. Она должна принимать решения в зависимости от уровня определенности, полноты и точности информации о ситуации и ее оценки: на первом уровне принимаются решения по однозначным ситуациям, на втором — по неоднозначным четким ситуациям, на третьем — по неоднозначным нечетким ситуациям [6, 19].

Это позволит эффективно решать не только задачу сбора ягод, но и другие возлагаемые на робота задачи, например, автономного перемещения по полю, оценку цвета плода и его товарного вида, сортировку ягод, удаление сорняков и т.п. Кроме того, ИСУ улучшит функциональные характеристики системы управления как мобильным роботом в целом, так и отдельных ее подсистем.

Методический аппарат принятия решения ИСУ мобильного робота по порядку его применения для сбора ягод

Сбор ягод зависит от погодных условий, сроков и скорости созревания ягоды и других условий и относится к неоднозначным четким ситуациям. Решение будет принимать ИСУ мобильного робота на втором ее уровне. При этом варианты решений оцениваются лингвистически. Поскольку возможные варианты решения оцениваются лингвистически, то наиболее эффективным методом является метод, описанный в работе [20]. Он основан на установлении отношения порядка на нечетких оценках, которое определяется через вероятностные оценки для их четких эквивалентов. Суть метода заключается в следующем.

Пусть требуется принять решение при лингвистических оценках вариантов. Имеется $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ — множество вариантов решений, соответствующих данной ситуации; $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ — множество исходов, причем исход s_i обусловлен альтернативой (вариантом) a_i ; $K(s_i) = \{K_1(s_i), K_2(s_i), \dots, K_m(s_i)\}$ — лингвистическая векторная оценка исхода s_i ; $K_q(s_i)$ — лингвистическая оценка (нечеткое число) исхода по q -му критерию. Введем нечеткое отношение порядка $\geq$ на множестве лингвистических векторных оценок $K = \{K(s_1), \dots, K(s_n)\}$. Для этого определим функцию принадлежности нечеткого отношения следующим образом: $\mu_{\geq}: K \times K \rightarrow [0, 1]$.

Обозначим $\mu_{\geq}\{K_q(s_i), K_q(s_j)\}$ через $\mu_{\geq}^q(s_i, s_j)$. Вычислить значение этой функции для нечетких чисел $K_q(s_i)$ и $K_q(s_j)$ можно по формуле

$$\mu_{\geq}(A, B) = 1 - \mu_{<}(A, B) = \mu_{>}(A, B) + \mu_{=}(A, B), \quad (1)$$

где A и B — нечеткие числа; $\mu_{>}$ — нечеткое отношение порядка типа "больше" на множестве нечетких чисел.

Степень истинности $\mu_{>}(A, B)$ нечеткого высказывания $A < B$ определим как вероятность того, что точное значение нечеткого числа A будет меньше точного значения нечеткого числа B :

$$\mu_{<}(A, B) = P(pv(A) < pv(B)),$$

где $pv(A)$ — четкое значение нечеткого числа A . Таким образом,

$$\mu_{<}(A, B) = \sum_{i=1}^{n-1} P(pv(A) = x_i \& pv(B) > x_i).$$

Естественно считать, что случайные величины, построенные на нечетких числах A и B , независимы. Тогда

$$\begin{aligned} P(pv(A) = x_i \& pv(B) > x_i) &= \\ &= P(pv(A) = x_i)P(pv(B) > x_i) = \\ &= v_A(x_i)(1 - P(pv(B) \leq x_i)) = \\ &= v_A(x_i)(1 - P(pv(B) < x_{i+1})), \quad i \in N_{n-1}, \end{aligned}$$

и значит

$$\mu_{<}(A, B) = \sum_{i=1}^{n-1} (v_A(x_i)(1 - w_B(x_{i+1}))), \quad (2)$$

где $v_E(X)$ — вероятность того, что в качестве точного значения числа E используется величина x ; $w_E(x)$ — вероятность того, что в качестве точного значения нечеткого числа E используется величина $y < x$:

$$w_E(x) = \sum_{\substack{y \in S_E \\ y < x}} v_E(y), \quad (3)$$

где $v_E(x) = \mu_E(x) \left[\sum_{y \in S_E} \mu_E(y) \right]^{-1}$; $\mu_E(x)$ — функция принадлежности.

Функцию $\mu_{\geq}$ определим следующим образом:

$$\mu_{\geq}[K(s_i), K(s_j)] = \underset{q \in N}{*} \mu_{\geq}^q(s_i, s_j),$$

где $*$ — знак обобщенной операции.

Тогда, поскольку между множеством вариантов и исходов имеет место взаимно однозначное соответствие, нечеткое отношение предпочтения на множестве вариантов определится функцией принадлежности $\mu_{\geq}^F: A \times A \rightarrow [0, 1]$, которая может быть определена по формуле

$$\mu_{\geq}^F(a_i, a_j) = \mu_{\geq}[K(s_i), K(s_j)].$$

Для случая четкого векторного критерия:

$$K(a_i) \geq K(a_j) \Leftrightarrow (\forall q \in N) (K_q(s_i) \geq K_q(s_j));$$

$$a_i \geq a_j \Leftrightarrow K(a_i) \geq K(a_j),$$

из выражения для $\mu_{\geq}^F$ можно получить матрицу парных сравнений вариантов по предпочтению $\Phi = \|\mu_{ij}\|_{n \times n}$, где $\mu_{ij} = \mu_{\geq}^F(a_i, a_j)$.

Решение задачи ранжирования вариантов предлагается провести на основе матрицы Φ .

1. Пусть I_j — множество индексов такое, что $I_j = N_n \setminus \{j\}$, $j \in N_n$. Определим нечеткое отношение предпочтения между вариантом a_j и всеми остальными вариантами с помощью функции принадлежности:

$$\mu_{\geq}^F(a_j; \{a_i\}, i \in I_j) = \bigwedge_{i \in I_j} \mu_{ji}, \quad j \in N_n.$$

Тогда решение задачи ранжирования вариантов будет описываться соотношениями:

$$\begin{aligned} r_j < r_k &\Leftrightarrow \mu_{\geq}^F(a_j; \{a_i\}, i \in I_j) > \mu_{\geq}^F(a_k; \{a_i\}, i \in I_k), \\ r_j = r_k &\Leftrightarrow \mu_{\geq}^F(a_j; \{a_i\}, i \in I_j) = \mu_{\geq}^F(a_k; \{a_i\}, i \in I_k), \end{aligned} \quad (4)$$

где r_j — ранг варианта.

Самый низший ранг имеет наиболее предпочтительный вариант. В случае, когда матрица Φ не позволяет провести ранжирование вариантов (матрица Φ такова, что значительная часть степеней принадлежности или все они равны нулю), предлагается воспользоваться следующей процедурой. Определяются ранги вариантов, для которых величины $\mu_{\geq}^F$ оказались не равными нулю. Полагается, что индексы этих вариантов принадлежат множеству I_* . Формируется матрица размерностью $l \times l$, где $l = |N_n \setminus I_*|$, с учетом лишь тех вариантов, индексы которых принадлежат множеству $N_n \setminus I_*$. Затем вновь применяется соотношение (4) с учетом номера рангов, уже использованных на предыдущем шаге.

2. Во второй процедуре решения задачи используется ранжирование вариантов на основе матрицы парных сравнений. Данная процедура состоит в отыскании собственного вектора $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$ матрицы Φ , соответствующего положительному собственному числу λ этой матрицы, путем решения уравнения $\Phi\mu = \lambda\mu$. Если решение уравнения существует, то вектор μ положителен. Решение задачи ранжирования в данном случае описывается соотношениями:

$$r_j < r_k \Leftrightarrow \mu_j > \mu_k; \quad r_j = r_k \Leftrightarrow \mu_j = \mu_k.$$

Наилучшим признается вариант, получивший наименьший ранг.

Алгоритм принятия решения ИСУ мобильного робота по порядку его применения для сбора ягод при лингвистической оценке вариантов решения

Таким образом, на втором уровне ИСУ мобильного робота при лингвистической оценке вариантов решения задача выбора формулируется следующим образом.

Математическая постановка задачи. Имеются $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ — варианты решений; $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ — исходы; $a_i \Rightarrow s_i$, $i = \overline{1, n}$; $K(s_i) = \{K_1(s_i), \dots, K_q(s_i), \dots, K_m(s_i)\}$, $q \in N = \overline{1, m}$ — лингвистическая оценка s_i . Требуется найти наилучший вариант.

При этом многокритериальный выбор предлагается проводить по следующему алгоритму.

1. Вычислить функцию принадлежности $\mu_{\leq}(K_q(s_i), K_q(s_j))$.

2. Вычислить функции принадлежности нечеткого отношения порядка $\geq$ на множестве лингвистических векторных оценок $K = \{K(s_1), \dots, K(s_n)\}$ $\mu_{\geq} : K \times K \rightarrow [0, 1]$ для $\forall q \in N$: $\mu_{\geq}(K_q(s_i), K_q(s_j)) = 1 - \mu_{\leq}(K_q(s_i), K_q(s_j))$, где $i, j = \overline{1, n}$.

3. Минимизировать это отношение $\mu_{\geq}[K(s_i), K(s_j)] = \min_{q \in N} \mu_{\geq}^q(K_q(s_i), K_q(s_j))$.

4. Вычислить отношение предпочтения на множестве вариантов

$$\mu_{\geq}^F : A \times A \rightarrow [0, 1]: \mu_{\geq}^F(a_i, a_j) = \mu_{\geq}[K(s_i), K(s_j)].$$

5. Провести ранжирование вариантов $a_i \geq a_j \Leftrightarrow K(a_i) \geq K(a_j)$ и получить матрицу парных сравнений вариантов по предпочтению $\Phi = \|\mu_{\geq}^F(a_i, a_j)\|$.

6. Сравнить отношение предпочтительности варианта с остальными:

$$\begin{aligned} r_j < r_k &\Leftrightarrow \mu_{\geq}^F(a_j; \{a_i\}, i \in I_j) > \mu_{\geq}^F(a_k; \{a_i\}, i \in I_k); \\ r_j = r_k &\Leftrightarrow \mu_{\geq}^F(a_j; \{a_i\}, i \in I_j) = \mu_{\geq}^F(a_k; \{a_i\}, i \in I_k). \end{aligned}$$

Получить решение. Наилучшим вариантом считается тот, у которого ранг минимальный, т.е. $r_j = \min$.

Результаты решения

ИСУ мобильного робота, предназначенного для сбора ягод, типа Agrobot необходимо выбрать один из вариантов порядка применения робота для сбора ягод в зависимости от условий сбора. Размер плантации — 800 соток. Производительность робота: при сборе крупных ягод — 800 соток приблизительно 0,5...1 день, крупных и средних — за 1...2 дня; всех ягод — за 2...3 дня.

Условие задачи. Пусть требуется принять решение при лингвистических оценках вариантов. Имеются $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ — множество вариантов решений, соответствующих данной ситуации; $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ — множество исходов, причем исход s_i обусловлен альтернативой (вариантом) a_i ; $K(s_i) = \{K_1(s_i), K_2(s_i), \dots, K_m(s_i)\}$ — лингвистическая векторная оценка исхода s_i ; $K_q(s_i)$ — лингвистическая оценка (нечеткое число) исхода по q -му критерию.

Пусть имеются три возможных варианта решения:

- a_1 — собирать только крупные ягоды при плохих условиях сбора за 3/4 дня;
- a_2 — собирать крупные и средние ягоды при удовлетворительных условиях за 1,5 дня;
- a_3 — собирать ягоды всех размеров, включая мелкие при хороших условиях сбора за 3 дня.

Плохие условия сбора: ожидается затяжной дождь, и ягоды будет нельзя собирать несколько дней, ягода будет созревать во время дождя медленнее, масса ее несколько увеличится, но качество ягод может снизиться, время на сбор ягод до дождя — не более 0,5 суток.

Удовлетворительные условия сбора: ожидается дождь, он будет идти от 0,5 до 1 суток, потом погода будет сухая и солнечная, и ягода высохнет, ягода начнет созревать быстрее после дождя, масса будет нормальной, все время на сбор ягод с учетом скорости созревания — 1,5...2 суток;

Хорошие условия сбора: наличие солнечной сухой погоды на длительный период времени, сбор ягод можно продолжать в последующие дни, но скорость созревания будет большая, масса ягод может снизиться, все время на сбор ягод с учетом скорости созревания 3 суток.

Допустим, что через 1...2 суток ожидается затяжной дождь, т.е. сбор ягод нужно провести в течение 1...2 дней.

Надо отметить, что в базу знаний ИСУ робота могут быть заложены различные варианты, число, которое необходимо выбрать для какой-то конкретной задачи, может определяться программными средствами.

Следовательно, $A = \{a_j\}$ ($j = \overline{1,3}$) — варианты решений. Оценки исходов $S = \{s_1, s_2, s_3\}$ для каждого $j = \overline{1,3}$ определены по трем критериям K_i , $i = 1, 2, 3$, только лингвистически (они заложены в базу знаний ИСУ). В качестве показателей критериев взяты:

- для K_1 — оперативность уборки ягод (вероятность своевременной уборки урожая за короткое время). Время сбора не должно превышать 2 суток ($K_1 \leq 2$ суток);
- для K_2 — вероятность получения сбора максимальной массы ягод при хорошем качестве ($K_2 = 0,8$);

- для K_3 — вероятность наличия хороших условий для сбора ягод (наличие солнечной сухой погоды на длительный период времени) ($K_3 \geq 0,7$).

Векторный критерий имеет вид: $K(a) = \{K_i(a_1), K_i(a_2), K_i(a_3)\}$.

Допустим, что через 1...2 суток ожидается затяжной дождь, т.е. сбор ягод нужно провести в течение 1...2 суток.

Необходимо найти наилучший вариант порядка применения мобильного робота для сбора ягод, обеспечивающий наибольшую прибыль от сбора ягод.

Исходя из условий определим задачу следующего вида:

$$K(a) = \{K_i(a_1), K_i(a_2), K_i(a_3)\} \rightarrow \max_{a \in A}.$$

Тогда векторный лингвистический критерий для вариантов представим в виде матрицы:

$$K = \begin{matrix} & \begin{matrix} K_1 & K_2 & K_3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} OB & C & OB \\ C & B & H \\ H & OB & OH \end{bmatrix} \end{matrix},$$

где **ОЧЕНЬ НИЗКИЙ:** $OH = \{1,0/1;0,8/2;0,2/3\}$;

НИЗКИЙ: $H = \{0,8/1;0,9/2;0,5/3;0,2/4\}$;

СРЕДНИЙ: $C = \{0,3/3;0,7/4;1,0/5;0,8/6;0,2/7\}$;

ВЫСОКИЙ: $B = \{0,2/7;0,5/8;0,9/9;0,8/10\}$;

ОЧЕНЬ ВЫСОКИЙ: $OB = \{0,2/8;0,8/9;1,0/10\}$.

Базовая переменная $X = \{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10\}$.

Решение задачи. Проведем расчеты в соответствии с предложенным ранее алгоритмом.

1. Вычислим степень предпочтения варианта a_j .

Этап 1. Вычисление функции принадлежности $\mu_{<}(K_q(s_i), K_q(s_i))$ по формулам (2), (3):

$$\begin{aligned} \mu_{<}(K_i(a_1), K_i(a_2), K_i(a_3)) &= \\ &= \sum_{m=1}^n v_{K_i(a_1)}(x_m) \left(1 - \sum_{j=1}^m v_{K_i(a_2)}(x_j) \right) \times \\ &\times \left(1 - \sum_{z=1}^m v_{K_i(a_3)}(z_j) \right). \end{aligned}$$

В соответствии с формулой (3) для различных вариантов имеем:

$$v_{K_i(a_1)}(x_m) = \frac{\mu_{K_i(a_1)}(x_m)}{\sum_{y \in S_{K_i(a_1)}} \mu_{K_i(a_1)}(y)};$$

$$v_{K_i(a_2)}(x_m) = \frac{\mu_{K_i(a_2)}(x_m)}{\sum_{y \in S_{K_i(a_2)}} \mu_{K_i(a_2)}(y)};$$

$$\nu_{K_i(a_3)}(x_m) = \frac{\mu_{K_i(a_3)}(x_m)}{\sum_{y \in S_{K_i(a_3)}} \mu_{K_i(a_3)}(y)},$$

где $i = \overline{1,3}$, $j = \overline{1,3}$.

Каждому лингвистическому критерию K_i для варианта a_j соответствует оценка (ОН, Н, С, В, ОВ). Например, для $K_1(a_1)$ — ОВ. Для каждой оценки имеются свои функции принадлежности. Например, $\mu_{K_1(a_1)}(x_1) = 0,2$; $\mu_{K_1(a_1)}(x_2) = 0,8$; $\mu_{K_1(a_1)}(x_3) = 1,0$; и т.д. Следовательно, для всех $i = \overline{1,3}$, $j = \overline{1,3}$ с учетом заданных множеств для оценок (ОН, Н, С, В, ОВ) определим $\sum \mu_{K_i(a_j)}$:

$$\begin{aligned} \sum_{y \in S_{K_1(a_1)}} \mu_{K_1(a_1)}(y) &= 0,2 + 0,8 + 1,0 = 2,0; \\ \sum_{y \in S_{K_1(a_2)}} \mu_{K_1(a_2)}(y) &= 0,3 + 0,7 + 1,0 + 0,8 + 0,2 = 3,0; \\ \sum_{y \in S_{K_1(a_3)}} \mu_{K_1(a_3)}(y) &= 0,8 + 0,9 + 0,5 + 0,2 = 2,4; \\ \sum_{y \in S_{K_2(a_1)}} \mu_{K_2(a_1)}(y) &= 0,3 + 0,7 + 1,0 + 0,8 + 0,2 = 3,0; \\ \sum_{y \in S_{K_2(a_2)}} \mu_{K_2(a_2)}(y) &= 0,2 + 0,5 + 0,9 + 0,8 = 2,4; \\ \sum_{y \in S_{K_2(a_3)}} \mu_{K_2(a_3)}(y) &= 0,2 + 0,8 + 1,0 = 2,0; \\ \sum_{y \in S_{K_3(a_1)}} \mu_{K_3(a_1)}(y) &= 0,2 + 0,8 + 1,0 = 2,0; \\ \sum_{y \in S_{K_3(a_2)}} \mu_{K_3(a_2)}(y) &= 0,8 + 0,9 + 0,5 + 0,2 = 2,4; \\ \sum_{y \in S_{K_3(a_3)}} \mu_{K_3(a_3)}(y) &= 1,0 + 0,8 + 0,2 = 2,0. \end{aligned}$$

Таким образом, имеем

$$\begin{aligned} \mu_{<}(K_1(a_1), K_1(a_2), K_1(a_3)) &= \\ &= \frac{0,2}{2,0} \left(1 - \frac{0,3}{3,0}\right) \left(1 - \frac{0,8}{2,4}\right) + \\ &+ \frac{0,8}{2,0} \left(1 - \frac{0,3+0,7}{3,0}\right) \left(1 - \frac{0,8+0,9}{2,4}\right) + \\ &+ \frac{1,0}{2,0} \left(1 - \frac{0,3+0,7+1,0}{3,0}\right) \times \\ &\times \left(1 - \frac{0,8+0,9+0,5}{2,4}\right) = 0,082; \\ \mu_{<}(K_2(a_1), K_2(a_2), K_2(a_3)) &= \\ &= \frac{0,3}{3,0} \left(1 - \frac{0,2}{2,4}\right) \left(1 - \frac{0,2}{2,0}\right) + \\ &+ \frac{0,7}{3,0} \left(1 - \frac{0,2+0,5}{2,4}\right) \left(1 - \frac{0,2+0,8}{2,0}\right) + \\ &+ \frac{1,0}{3,0} \left(1 - \frac{0,2+0,5+0,9}{2,4}\right) \left(1 - \frac{0,2}{2,0}\right) = 0,165; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_{<}(K_3(a_1), K_3(a_2), K_3(a_3)) &= \\ &= \frac{0,2}{2,0} \left(1 - \frac{0,8}{2,4}\right) \left(1 - \frac{1,0}{2,0}\right) + \\ &+ \frac{0,8}{2,0} \left(1 - \frac{1,7}{2,4}\right) \left(1 - \frac{1,8}{2,0}\right) + \\ &+ \frac{1,0}{2,0} \left(1 - \frac{2,2}{2,4}\right) \left(1 - \frac{2,0}{2,0}\right) = 0,0045. \end{aligned}$$

Этап 2. Вычисление нечеткого отношения $\mu_{\geq}$:

$$\begin{aligned} \mu_{\geq}(K_i(a_1), K_i(a_2), K_i(a_3)) &= \\ &= 1 - \mu_{<}(K_i(a_1), K_i(a_2), K_i(a_3)) \text{ для всех } i = \overline{1,3}; \\ \mu_{\geq}(K_1(a_1), K_1(a_2), K_1(a_3)) &= 0,918; \\ \mu_{\geq}(K_2(a_1), K_2(a_2), K_2(a_3)) &= 0,835; \\ \mu_{\geq}(K_3(a_1), K_3(a_2), K_3(a_3)) &= 0,955. \end{aligned}$$

Этап 3. Минимизируем отношение $\mu_{\geq}$:

$$\begin{aligned} \mu_{\geq}(K_1(a_1), K_1(a_2), K_1(a_3)) &= \\ &= \min_i \mu_{\geq}(K_i(a_1), K_i(a_2), K_i(a_3)) = \\ &= \min_i (0,918; 0,835; 0,955) = 0,835. \end{aligned}$$

Этап 4. Вычисление отношения предпочтения на множестве вариантов:

$$\mu_{\geq}(a_1, a_2, a_3) = \mu_{\geq}(K(a_1), K(a_2), K(a_3)) = 0,835.$$

Этап 5. Таким образом, степень предпочтения варианта $\mu_{\geq}(a_1) = 0,835$.

2. Вычислим степень предпочтения варианта a_2 .

Этап 1. Вычисление функции принадлежности $\mu_{<}(K_q(s_i), K_q(s_j))$ по формулам (2), (3) с учетом заданных множеств для оценок (ОН, Н, С, В, ОВ) и полученных значений $\sum \mu_{K_i(a_j)}$:

$$\begin{aligned} \mu_{<}(K_1(a_2), K_1(a_1), K_1(a_3)) &= \\ &= \frac{0,3}{3,0} \left(1 - \frac{0,2}{2,0}\right) \left(1 - \frac{0,8}{2,4}\right) + \frac{0,7}{3,0} \left(1 - \frac{1,0}{2,0}\right) \left(1 - \frac{1,7}{2,4}\right) + \\ &+ \frac{1,0}{3,0} \left(1 - \frac{2,0}{2,0}\right) \left(1 - \frac{2,2}{2,4}\right) = 0,094; \\ \mu_{<}(K_2(a_2), K_2(a_1), K_2(a_3)) &= \\ &= \frac{0,2}{2,4} \left(1 - \frac{0,3}{3,0}\right) \left(1 - \frac{0,2}{2,0}\right) + \frac{0,5}{2,4} \left(1 - \frac{1,0}{3,0}\right) \left(1 - \frac{1,0}{2,0}\right) + \\ &+ \frac{1,6}{2,4} \left(1 - \frac{2,0}{3,0}\right) \left(1 - \frac{2,0}{2,0}\right) = 0,137; \\ \mu_{<}(K_3(a_2), K_3(a_1), K_3(a_3)) &= \\ &= \frac{0,8}{2,4} \left(1 - \frac{0,2}{2,0}\right) \left(1 - \frac{0,2}{2,0}\right) + \frac{0,9}{2,4} \left(1 - \frac{1,0}{2,0}\right) \left(1 - \frac{1,0}{2,0}\right) + \\ &+ \frac{0,5}{2,4} \left(1 - \frac{2,0}{2,0}\right) \left(1 - \frac{2,0}{2,0}\right) = 0,364. \end{aligned}$$

Этап 2. Вычисление нечеткого отношения $\mu_{\geq}$:

$$\begin{aligned} \mu_{\geq}(K_i(a_2), K_i(a_1), K_i(a_3)) &= \\ = 1 - \mu_{<}(K_i(a_2), K_i(a_1), K_i(a_3)) &\text{ для всех } i = \overline{1, 3}. \\ \mu_{\geq}(K_1(a_2), K_1(a_1), K_1(a_3)) &= 0,906; \\ \mu_{\geq}(K_2(a_2), K_2(a_1), K_2(a_3)) &= 0,863; \\ \mu_{\geq}(K_3(a_2), K_3(a_1), K_3(a_3)) &= 0,636. \end{aligned}$$

Этап 3. Минимизируем отношение $\mu_{\geq}$:

$$\begin{aligned} \mu_{\geq}(K(a_2), K(a_1), K(a_3)) &= \\ = \min_i \mu_{\geq}(K_i(a_2), K_i(a_1), K_i(a_3)) &= 0,636. \end{aligned}$$

Этап 4. Вычисление отношения предпочтения на множестве вариантов:

$$\begin{aligned} \mu_{\geq}(a_2, a_1, a_3) &= \mu_{\geq}(K(a_2), K(a_1), K(a_3)) = 0,636, \\ \mu_{\geq}(a_2) &= 0,636. \end{aligned}$$

Этап 5. Сравниваем отношение предпочтительности варианта a_2 с a_1 . Так как $\mu_{\geq}(a_1) > \mu_{\geq}(a_2)$, то $a_1 \succ a_2$.

3. Вычислим степень предпочтения варианта a_3 .

Этап 1. Вычисление функции принадлежности $\mu_{<}(K_q(s_i), K_q(s_i))$ по формулам (2), (3) с учетом заданных множеств для оценок (ОН, Н, С, В, ОВ) и полученных значений $\sum \mu_{K_i(a_j)}$:

$$\begin{aligned} \mu_{<}(K_1(a_3), K_1(a_1), K_1(a_2)) &= \\ = \frac{0,8}{2,4} \left(1 - \frac{0,2}{2,0}\right) \left(1 - \frac{0,3}{3,0}\right) + \frac{0,9}{2,4} \left(1 - \frac{1,0}{2,0}\right) \left(1 - \frac{1,0}{3,0}\right) + \\ + \frac{0,5}{2,4} \left(1 - \frac{2,0}{2,0}\right) \left(1 - \frac{2,0}{3,0}\right) &= 0,395; \\ \mu_{<}(K_2(a_3), K_2(a_1), K_2(a_2)) &= \\ = \frac{0,2}{2,0} \left(1 - \frac{0,3}{3,0}\right) \left(1 - \frac{0,2}{2,4}\right) + \frac{0,8}{2,0} \left(1 - \frac{1,0}{3,0}\right) \left(1 - \frac{0,7}{2,4}\right) + \\ + \frac{1,0}{2,0} \left(1 - \frac{2,0}{3,0}\right) \left(1 - \frac{0,2}{2,4}\right) &= 0,327; \\ \mu_{<}(K_3(a_3), K_3(a_1), K_3(a_2)) &= \\ = \frac{1,0}{2,0} \left(1 - \frac{0,2}{2,0}\right) \left(1 - \frac{0,8}{2,4}\right) + \frac{0,8}{2,0} \left(1 - \frac{1,0}{2,0}\right) \left(1 - \frac{1,7}{2,4}\right) + \\ + \frac{0,2}{2,0} \left(1 - \frac{2,0}{2,0}\right) \left(1 - \frac{2,2}{2,4}\right) &= 0,358. \end{aligned}$$

Этап 2. Вычисление нечеткого отношения $\mu_{\geq}$:

$$\begin{aligned} \mu_{\geq}(K_i(a_3), K_i(a_1), K_i(a_2)) &= \\ = 1 - \mu_{<}(K_i(a_3), K_i(a_1), K_i(a_2)) &\text{ для всех } i = \overline{1, 3}. \\ \mu_{\geq}(K_1(a_3), K_1(a_1), K_1(a_2)) &= 0,605; \end{aligned}$$

$$\mu_{\geq}(K_2(a_3), K_2(a_1), K_2(a_2)) = 0,673;$$

$$\mu_{\geq}(K_3(a_3), K_3(a_1), K_3(a_2)) = 0,642.$$

Этап 3. Минимизируем отношение $\mu_{\geq}$:

$$\begin{aligned} \mu_{\geq}(K(a_3), K(a_1), K(a_2)) &= \\ = \min_i \mu_{\geq}(K_i(a_3), K_i(a_1), K_i(a_2)) &= 0,605. \end{aligned}$$

Этап 4. Вычисление отношения предпочтения на множестве вариантов:

$$\begin{aligned} \mu_{\geq}(a_3, a_1, a_2) &= \mu_{\geq}(K(a_3), K(a_1), K(a_2)) = 0,636, \\ \mu_{\geq}(a_3) &= 0,605. \end{aligned}$$

Этап 5. Сравниваем отношение предпочтительности варианта a_3 с a_1 . Так как $\mu_{\geq}(a_1) > \mu_{\geq}(a_3)$, то $a_1 \succ a_3$.

Таким образом, вариант a_1 предпочтительнее вариантов a_2 и a_3 . Следовательно, роботу необходимо собирать только крупные ягоды.

Заключение

Установлено, что при известной урожайности данного сорта земляники садовой прибылью от собранной ягоды зависит от: погодных условий и продолжительности хорошей погоды, оперативности сбора ягоды, массы собираемой ягоды, технических характеристик мобильного робота (его производительности). Ввиду неопределенности и нечеткости задач, которые должны быть решены ИСУ мобильным роботом при сборе ягоды на полях с открытым грунтом, предложено использовать для их решения технологии искусственного интеллекта. Сформулирована постановка задачи и разработан методический аппарат выбора принятия решения ИСУ мобильного робота по порядку применения робота для сбора ягоды. При лингвистической оценке возможных вариантов решения предложено использовать метод, основанный на установлении отношения порядка на нечетких оценках, которое определяется через вероятностные оценки для их четких эквивалентов. В качестве решения задачи выбора порядка применения мобильного робота выбирается вариант с наименьшим рангом из полученного ранжированного ряда возможных вариантов решения. Методический аппарат применен для решения задачи выбора порядка применения мобильного робота типа Agrobot для сбора ягоды. Данный аппарат может быть реализован при разработке программного обеспечения не только при управлении интеллектуальными мобильными роботами сбора ягоды, но и при управлении роботами иного назначения.

Список литературы

1. Кафиев И. Р., Романов П. С., Романова И. П. Методический аппарат выбора информационной технологии для управления сельскохозяйственными роботами // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2017. № 4 (44). С. 62—68.
2. Каляев И. А., Лохин В. М., Макаров И. М., Манько С. В., Романов М. П., Юревич Е. И. Интеллектуальные роботы / Под общей ред. Е. И. Юревича. М.: Машиностроение, 2007. 360 с.
3. Кафиев И. Р., Романов П. С., Романова И. П., Галиуллин Р. Р. Методика распознавания нечетких ситуаций при управлении сельскохозяйственными мобильными роботами // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2019. № 3 (51). С. 106—114.
4. Kafiev I. R., Romanov P. S., Romanova I. P. The selecting of artificial intelligence technology for control of mobile robots // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). IEEE Xplore: 07 January 2019.2019. URL: ieeexplore.ieee.org/document/8602796.
5. Романов П. С., Романова И. П. Математическая модель нечеткого управления портальной автомобильной мойкой // Инженерный вестник Дона. 2018, № 1 (48). URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2018/4730.
6. Романов П. С., Романова И. П. Подходы к созданию интеллектуальной системы управления мобильным роботом // Инженерный вестник Дона. 2018. № 1(48). URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2018/4692.
7. Кафиев И. Р., Романов П. С., Романова И. П. К вопросу нечеткого управления электроприводами сельскохозяйственных интеллектуальных роботов // Российский электронный научный журнал. 2017. № 4 (26). С. 174—187.
8. Романов П. С., Рязанцев А. И., Антипов А. О., Романова И. П. Нечеткое управление роботизированной дождеваль-

ной машиной типа "Фрегат" // Инженерный вестник Дона. 2018. № 2 (49). URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2018/4819.

9. Рыбин И. А., Рубанов В. Г. Математическая модель системы управления мобильного транспортного средства // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18. № 5. С. 333—340.

10. Nuno Mendes, Pedro Neto. Indirect adaptive fuzzy control for industrial robots: A solution for contact applications // Expert Systems with Applications. 2015. Vol. 42, Iss. 22. P. 8929—8935.

11. JiaWang Chen, Huangchao Zhu, Lei Zhang, Yuxia Sun. Research on fuzzy control of path tracking for underwater vehicle based on genetic algorithm optimization // Ocean Engineering. 2018. Vol. 156. P. 217—223.

12. Пучков Е. В. Сравнительный анализ алгоритмов обучения искусственной нейронной сети // Инженерный вестник Дона. 2013. № 4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2135/.

13. Roland Siegwart, Illah Reza Nourbakhsh, Davide Scaramuzza. Introduction to Autonomous Mobile Robots (Intelligent Robotics and Autonomous Agents series). The MIT Press; Cambridge second edition, 2011. 472 p.

14. Janglová D. Neural networks in mobile robot motion // Cut. Edge Robot. 2005. Vol. 1, N. 1. P. 243—254.

15. URL: <https://mcem.ru/articles/desyat-robotov-dlya-ber-ezhnogo-sbora-urozhaya>.

16. URL: <http://www.activestudy.info/ispolzovanie-yagod-zemlyaniki-mashinnogo-sbora/>.

17. URL: <http://fri-go.ru/sbor-urozhaya-zemlyaniki.html>.

18. URL: <http://mbgazeta.ru/arhiv/v-pole-vygodit-bespilotnik-agrobot/>.

19. Романов П. С. Модель и функционально-структурная схема интеллектуальной системы управления робототехнической системы // Вестник Коломенского института (филиала) Московского политехнического университета. Серия: Естественные и технические науки. 2017. № 10. С. 118—130.

20. Борисов А. Н., Крумберг О. А., Федоров И. П. Принятие решений на основе нечетких моделей. Примеры использования. Рига: Зинатне, 1990. 184 с.

P. S. Romanov, Dr. Tech. Sc., Professor, e-mail: romanov_p_s@mail.ru, ORCID: 0000-0002-9969-3139, Kolomna Institute (branch) of "Moscow Polytechnical University" (Kolomna Institute (branch) of MPU), Moscow district, Kolomna, 408, Russian Federation,

I. P. Romanova, Cand. of Tech. Sc., Associate Professor, e-mail: i-p-romanova@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-5883-9907,

K. G. Razumovsky Moscow State University of technologies and management (the First Cossack University) (RAZUMOVSKY MSUTM (FCU)), Moscow, 109004, Russian Federation

Methodological Apparatus of Decision-Making and Intelligent Control of a Mobile Robot while Collecting Berries

The article deals with one of the tasks of intelligent agricultural mobile robot control — the task of selecting the way of application of the robot for picking the berries. One of the most popular berries grown in the European part of Russia is strawberries. Picking accounts to about 53 % of the total labor hours needed in growing strawberries. It is established that with the known yield of this strawberry cultivars, the profit from the picked berries depends on the weather conditions and the duration of good (dry and sunny) weather, on the efficiency of picking berries, on the weight and quality of the picked berries, on the technical characteristics of the mobile robot (its performance). The methodical apparatus of decision-making choice by the intelligent control system of a mobile robot is developed in the linguistic evaluation of the usage options for picking berries. The apparatus relies on a method based on establishing an order relation on fuzzy estimates, which is determined through probabilistic estimates for their clear equivalents. As a solution of this problem, the variant with the lowest rank from the obtained ranked series of possible solutions is chosen. Methodological apparatus applied to the solution of the problem of choosing the order of application of mobile robot the type of Agrobot for picking the berries. This device can be implemented in the development of software not only in the management of intelligent mobile robots picking berries, but also in the management of robots for other purposes.

Keywords: mobile robot; artificial intelligence; intelligent control system; decision — making; linguistic evaluation of solutions; the method of establishing order relations on fuzzy estimates; berry picking

References

1. Kafiev I. R., Romanov P. S., Romanova I. P. The methodology underlying the choice of information technologies for the control of agricultural robots, *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2017, no. 4 (44), pp. 62–68 (in Russian).
2. Kaljaev I. A., Lohin V. M., Makarov I. M., Manko S. V., Romanov M. P., Yurevich E. I. Intelligent robots, Moscow, Mashinostroenie, 2007, 360 p. (in Russian).
3. Kafiev I. R., Romanov P. S., Romanova I. P., Galiullin R. R. Methods of fuzzy pattern recognition situations in the management of agricultural mobile robots, *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2019, no. 3(51), pp. 106–114 (in Russian).
4. Kafiev I. R., Romanov P. S., Romanova I. P. The selecting of artificial intelligence technology for control of mobile robots, *2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). IEEE Xplore: 07 January 2019*, 2019, available at: ieeexplore.ieee.org/document/8602796.
5. Romanov P. S., Romanova I. P. Mathematical model of fuzzy control portal car wash, *Inženernyj vestnik Dona (Rus)*, 2018, no. 1 (48), available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/nly2018/4730 (in Russian).
6. Romanov P. S., Romanova I. P. Approaches to creating an intelligent control system for a mobile robot, *Inženernyj vestnik Dona (Rus)*, 2018, no. 1(48), available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/nly2018/4692 (in Russian).
7. Kafiev I. R., Romanov P. S., Romanova I. P. On the issue of fuzzy control of electric drives of agricultural intelligent robots, *Rossiiskij jelektronnyj nauchnyj zhurnal*, 2017, no. 4 (26), pp. 174–187 (in Russian).
8. Romanov P. S., Ryazantsev A. I., Antipov A. O., Romanova I. P. Fuzzy control of a robotic sprinkler type machine "Fregat", *Inženernyj vestnik Dona (Rus)*, 2018, no. 2, available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4819 (in Russian).
9. Rybin I. A., Rubanov V. G. Mathematical model of the mobile vehicle control system, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 5, pp. 333–340 (in Russian).
10. Nuno Mendes, Pedro Neto. Indirect adaptive fuzzy control for industrial robots: A solution for contact applications, *Expert Systems with Applications*, 2015, vol. 42, iss. 22, pp. 8929–8935.
11. Jia Wang Chen, Huangchao Zhu, Lei Zhang, Yuxia Sun. Research on fuzzy control of path tracking for underwater vehicle based on genetic algorithm optimization, *Ocean Engineering*, 2018, vol. 156, pp. 217–223.
12. Puchkov E. V. Comparative analysis of artificial neural network learning algorithms, *Inženernyj vestnik Dona (Rus)*, 2013, no. 4, available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2135/ (in Russian).
13. Roland Siegwart, Illah Reza Nourbakhsh, Davide Scaramuzza. Introduction to Autonomous Mobile Robots (*Intelligent Robotics and Autonomous Agents series*), The MIT Press; Cambridge second edition, 2011, 472 p.
14. Janglová D. Neural networks in mobile robot motion, *Cut. Edge Robot*, 2005, vol. 1, no. 1, pp. 243–254.
15. Available at: <https://mcem.ru/articles/desyat-robotov-dlya-berezhnogo-sbora-urozhaya>.
16. Available at: <http://www.activestudy.info/ispolzovanie-ya-god-zemlyaniki-mashinnogo-sbora/>.
17. Available at: <http://fri-go.ru/sbor-urozhaya-zemlyaniki.html>.
18. Available at: <http://mbgazeta.ru/arhiv/v-pole-vyvodit-be-spilotnik-agrobot/>.
19. Romanov P. S. Model and functional and structural diagram of the intelligent control system of a robotic system, *Vestnik Kolomenskogo instituta (filiala) Moskovskogo politehnicheskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tehnicheckie nauki*, 2017, no. 10, pp. 118–130 (in Russian).
20. Borisov A. N., Grumberg O. A., Fedorov I. P. Making decisions based on fuzzy models. Example of use, Riga, Zinatne, 1990, 184 p. (in Russian).

Уважаемые читатели!

В журнале "Информационные технологии" №7, 2020 на стр. 387 по вине редакции допущена опечатка. В сноске 1 вместо слов "Часть 1 опубликована в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление", 2020, т. 21, № 6" следует читать "Часть 1 опубликована в журнале "Информационные технологии", 2020, т. 26, № 6".

Адрес редакции:

107076, Москва, Стромнинский 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 05.06.2020. Подписано в печать 30.07.2020. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ ИТ820. 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 "Авансд солишнз". Отпечатано в ООО "Авансд солишнз".

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

Рисунок к статье В. А. Бимакова, Е. В. Бимакова
**«ПОВЫШЕНИЕ СКОРОСТИ И КАЧЕСТВА АНАЛИЗА 3D-СЦЕН, СКАНИРУЕМЫХ
 ДАТЧИКАМИ АВТОНОМНОГО РОБОТА»**

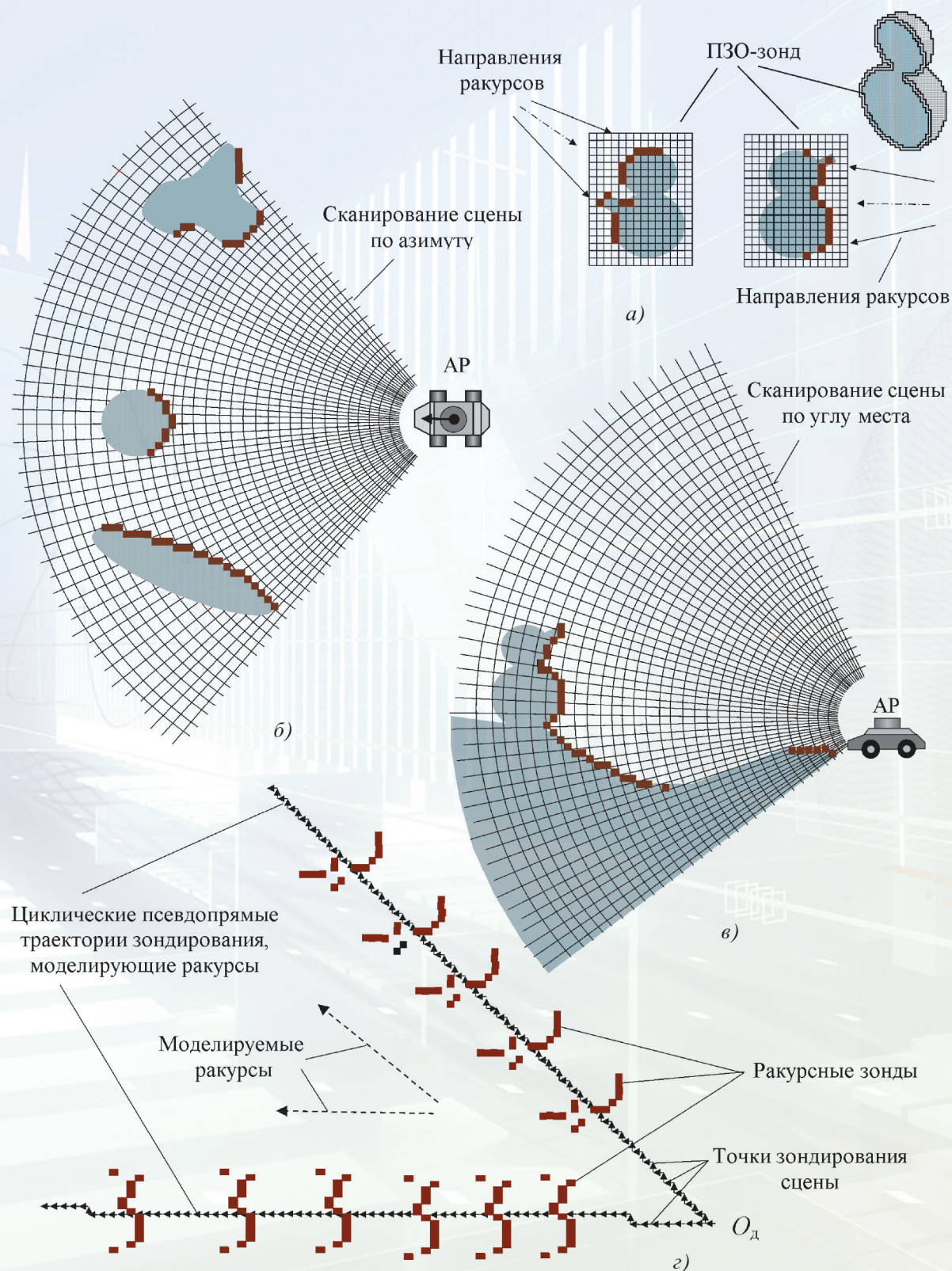


Рис. 3. Распознавание ПЗО с применением ракурсных зондов и траекторий зондирования в виде пучка разнонаправленных псевдопрямых

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

выпускает научно-технические журналы



Ежемесячный теоретический
и прикладной научно-технический журнал

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития основных направлений в области разработки, производства и применения информационных технологий.

Подписной индекс по Объединенному каталогу
«Пресса России» – 72656



Научно-практический
и учебно-методический журнал

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В журнале освещаются достижения и перспективы в области исследований, обеспечения и совершенствования защиты человека от всех видов опасностей производственной и природной среды, их контроля, мониторинга, предотвращения, ликвидации последствий аварий и катастроф, образования в сфере безопасности жизнедеятельности.

Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 79963

Междисциплинарный
теоретический и прикладной
научно-технический журнал

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития нано- и микросистемной техники, рассматриваются вопросы разработки и внедрения нано- и микросистем в различные области науки, технологии и производства.



Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 79493



Ежемесячный теоретический
и прикладной
научно-технический журнал

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

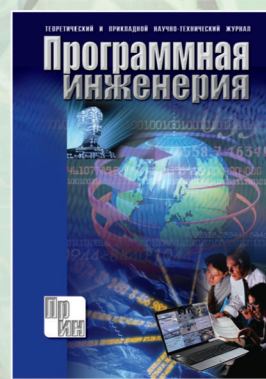
В журнале освещаются достижения в области мехатроники, интегрирующей механику, электронику, автоматику и информатику в целях совершенствования технологий производства и создания техники новых поколений. Рассматриваются актуальные проблемы теории и практики автоматического и автоматизированного управления техническими объектами и технологическими процессами в промышленности, энергетике и на транспорте.

Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 79492

Теоретический
и прикладной
научно-технический журнал

ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

В журнале освещаются состояние и тенденции развития основных направлений индустрии программного обеспечения, связанных с проектированием, конструированием, архитектурой, обеспечением качества и сопровождением жизненного цикла программного обеспечения, а также рассматриваются достижения в области создания и эксплуатации прикладных программно-информационных систем во всех областях человеческой деятельности.



Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 22765

Адрес редакции журналов для авторов и подписчиков:

107076, Москва, Стромынский пер., 4. Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ".
Тел.: (499) 269-55-10, 269-53-97. Факс: (499) 269-55-10. E-mail: antonov@novtex.ru