

# МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 8 (161)

август

2014

**Редакционный совет:**

VIDYADHAR S., PhD, prof.  
JEN-HWA GUO, PhD, prof.  
JERRY L., PhD, prof.  
KATALINIC B., PhD, prof.  
АЛИЕВ Т. А., акад. НАНА, проф.  
АНШАКОВ Г. П., чл.-корр. РАН, проф.  
БОЛОТНИК Н. Н., чл.-корр. РАН, проф.  
ВАСИЛЬЕВ С. Н., акад. РАН, проф.  
КАЛЯЕВ И. А., чл.-корр. РАН, проф.  
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г., чл.-корр. НАНБ, проф.  
КУЗНЕЦОВ Н. А., акад. РАН, проф.  
ЛЕОНОВ Г. А., чл.-корр. РАН, проф.  
МАТВЕЕНКО А. М., акад. РАН, проф.  
МИКРИН Е. А., акад. РАН, проф.  
ПЕШЕХОНОВ В. Г., акад. РАН, проф.  
РЕЗЧИКОВ А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.  
СЕБРЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН, проф.  
СИГОВ А. С., акад. РАН, проф.  
СОЙФЕР В. А., чл.-корр. РАН, проф.  
СОЛОВЬЕВ В. А., чл.-корр. РАН, проф.  
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М., чл.-корр. РАН, проф.  
ФЕДОРОВ И. Б., акад. РАН, проф.  
ЧЕНЦОВ А. Г., чл.-корр. РАН, проф.  
ЧЕРНОУСЬКО Ф. Л., акад. РАН, проф.  
ШЕРБАТЮК А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.  
ЮСУПОВ Р. М., чл.-корр. РАН, проф.

**Главный редактор:**

ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с. н. с.

**Заместители гл. редактора:**

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

**Ответственный секретарь:**

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

**Редакционная коллегия:**

АЛЕКСАНДРОВ В. В., д. ф.-м. н., проф.  
АНТОНОВ Б. И.  
АРШАНСКИЙ М. М., д. т. н., проф.  
БУКОВ В. Н., д. т. н., проф.  
ВИТТИХ В. А., д. т. н., проф.  
ГРАДЕЦКИЙ В. Г., д. т. н., проф.  
ИВЧЕНКО В. Д., д. т. н., проф.  
ИЛЬЯСОВ Б. Г., д. т. н., проф.  
КОЛОСОВ О. С., д. т. н., проф.  
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф., д. т. н., проф.  
ЛЕБЕДЕВ Г. Н., д. т. н., проф.  
ЛОХИН В. М., д. т. н., проф.  
ПАВЛОВСКИЙ В. Е., д. ф.-м. н., проф.  
ПРОХОРОВ Н. Л., д. т. н., проф.  
ПШИХОПОВ В. Х., д. т. н., проф.  
РАПОПОРТ Э. Я., д. т. н., проф.  
СЕРГЕЕВ С. Ф., д. пс., с. н. с.  
ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д. т. н., проф.  
ФРАДКОВ А. Л., д. т. н., проф.  
ФУРСОВ В. А., д. т. н., проф.  
ЮРЕВИЧ Е. И., д. т. н., проф.

**Редакция:**

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

## СОДЕРЖАНИЕ

**МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТОВ И АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

- Чебурахин И. Ф., Егорова Е. К.** Автоматизация конструирования определенных счетных классов булевых функций и минимизация их сложности . . . . . 3
- Аль-Сабул Али Хуссейн Хасан, Грачев А. Н.** Параметрическая идентификация линейных динамических объектов с использованием быстрого генетического алгоритма. . . . . 9

**ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

- Евдокименков В. Н., Красильщиков М. Н., Себряков Г. Г.** Контроль и интеллектуальная поддержка действий летчика при выполнении типовых полетных режимов на основе индивидуально-адаптированного подхода . . . . . 16

**УПРАВЛЕНИЕ ТРАНСПОРТНЫМИ СИСТЕМАМИ**

- Беляков С. Л., Боженюк А. В., Кожаров И. А.** Адаптация грузопотока в механических транспортных системах на основе опыта его наблюдения . . . . . 23
- Чубуков Н. Н.** Анализ проблем и перспективы интеллектуализации транспортных сетей . . . . . 28

**КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

- Будко Н. П., Будко П. А., Литвинов А. И., Винограденко А. М.** Реализация кинетического метода контроля и диагностики технических средств . . . . . 37

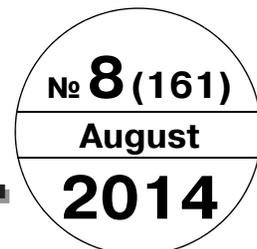
**Журнал в журнале****"УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА  
В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"**

- Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А., Щербатюк А. Ф., Мурсалимов Э. Ш., Туфанов И. Е.** Новый метод контурного управления движением АНПА . . . . . 46
- Дорожко В. М.** Динамическая нагрузка аномальной вейвлет-волны на неподвижное препятствие. . . . . 56
- Загоруйко С. Н., Казьмин В. Н., Носков В. П.** Навигация БПЛА и 3D-реконструкция внешней среды по данным бортовой СТЗ . . . . . 62
- Жаринов И. О., Кирсанова Ю. А., Коновалов П. В., Костишин М. О.** Алгоритм формирования и вывода картографических изображений в системах навигации пилотируемых летательных аппаратов . . . . . 68

*Журнал входит в Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования*

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:  
<http://novtex.ru/mech>, e-mail: [mech@novtex.ru](mailto:mech@novtex.ru)

# MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL



## МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

### Editorial Council:

ALIEV T. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 ANSHAKOV G. P., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 BIDYADHAR S., PhD, prof.  
 BOLOTNIK N. N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof.  
 VASILYEV S.N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof.  
 JEN-HWA GUO, PhD, prof.  
 JERRY L., PhD, prof.  
 KALYAEV I. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 KATALINIC B., PhD, prof.  
 KRASNEVSKIY L. G., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 KUZNETSOV N. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 LEONOV G. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof.  
 MATVEENKO A. M., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 MIKRIN E. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 PESHEKHONOV V. G., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 REZCHIKOV A. F., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 SEBRYAKOV G. G., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 SIGOV A. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof.  
 SOJFER V. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 SOLOVJEV V. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 SOLOMENTSEV Yu. M., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 FEDOROV I. B., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 CHENTSOV A. G., Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof.  
 CHERNOUSKO F. L., Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof.  
 SCHERBATYUK A. F., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 YUSUPOV R. M., Dr. Sci. (Tech.), prof.

### Editor-in-Chief:

FILIMONOV N. B., Dr. Sci. (Tech.), prof.

### Deputy Editor-in-Chief:

PODURAEV Yu. V., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 PUTOV V. V., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 YUSCHENKO A. S., Dr. Sci. (Tech.), prof.

### Responsible Secretary:

BEZMENOVA M. Yu.

### Editorial Board:

ALEXANDROV V. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof.  
 ANTONOV B. I.  
 ARSHANSKY M. M., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 BUKOV V. N., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 VITTIKH V. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 GRADETSKY V. G., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 IVCHENKO V. D., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 ILYASOV B. G., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 KOLOSOV O. S., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 KOROSTELEV V. F., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 LEBEDEV G. N., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 LOKHIN V. M., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 PAVLOVSKY V. E., Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof.  
 PROKHOROV N. L., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 PSHIKHOPOV V. Kh., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 RAPOPORT E. Ya., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 SERGEEV S. F., Dr. Sci. (Psychol.), prof.  
 FILARETOV V. F., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 FRADKOV A. L., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 FURSOV V. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 YUREVICH E. I., Dr. Sci. (Tech.), prof.

### Editorial Staff:

GRIGORIN-RYABOVA E.V.

## CONTENTS

### METHODS OF THE THEORY OF AUTOMATIC CONTROL

**Cheburahin I. F., Egorova E. K.** Automating the Designing of Certain Countable Classes of Boolean Functions and Minimization of Complexity . . . . . 3

**Al-Sabool Ali Hussen Hasan, Grachev A. N.** Parameter Identification of Linear Dynamic Systems by Fast Genetic Algorithm . . . . . 9

### ERGATIC CONTROL SYSTEMS

**Evdokimenkov V. N., Krasilshchikov M. N., Sebrjakov G. G.** Pilot Actions Individually Adopted Intellectual Both Monitoring and Support Applying to Standard Flight Modes. . . 16

### CONTROL OF TRANSPORT SYSTEMS

**Belyakov S. L., Bozhenyuk A. V., Kozharov I. A.** Adaptation of Cargo Flow in the Mechanical Transport Systems Based on the Experience of his Observations . . . . . 23

**Chubukov N. N.** Analysis of Problems and Prospects of Intellectualization Transport Networks . . . . . 28

### CONTROL AND DIAGNOSTICS OF TECHNICAL SYSTEMS

**Budko N. P., Budko P. A., Litvinov A. I., Vinogradenko A. M.** Realization of the Kinetic Control Method and Diagnostics of Technical Means . . . . . 37

### Journal within journal

### "CONTROL AND INFORMATICS IN THE AEROSPACE AND MARINE SYSTEMS"

**Filaretov V. F., Yukhimets D. A., Scherbatyuk A. Ph., Mursalimov E. Sh., Tuphanov I. E.** The Method of Tracking Control of Autonomous Unmanned Underwater Vehicle Motion . . . 46

**Dorozhko V. M.** Dynamic Load of the Abnormal Wavelet-Wave on the Motionless Obstacle. . . . 56

**Zagoruyko S. N., Kazmin V. N., Noskov V. P.** 3D Vision-Based Unmanned Vehicle Navigation and 3D Reconstruction of Environments . . . . . 62

**Zharinov I. O., Kirsanova Ju. A., Kononov P. V., Kostishin M. O.** The Algorithm for Generating and Outputting the Image Map Navigation Systems Manned Aircraft . . . . . 68

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

УДК 519.7:004.31

**И. Ф. Чебурахин**, д-р техн. наук, проф., cybernetics@mati.ru,

**Е. К. Егорова**, аспирант, egorovaek@mati.ru, МАТИ-РГТУ имени К. Э. Циолковского, Москва

## Автоматизация конструирования определенных счетных классов булевых функций и минимизация их сложности

*Предлагается конструктивный метод синтеза суперпозиционных формул (схем их функциональных элементов), в результате которого на основе функциональных уравнений аналитически получаются верхние оценки значений показателей сложности по числу базисных функций (функциональных элементов) и другие оценки. Приводится сопоставление сложностей функций отдельных счетных классов в стандартном базисе и базисе Жегалкина.*

**Ключевые слова:** счетные классы булевых функций, функциональные уравнения, меры сложности, минимизация, синтез формул (схем из функциональных элементов), декомпозиция

### Введение

Теория булевых (логических) функций лежит в основе современной дискретной математики, а сами булевы функции представляют собой самые простые объекты дискретной природы. Язык булевых функций хорошо приспособлен для описания разделения целого на части и взаимодействия этих частей. Поэтому он широко используется в самых разнообразных областях человеческого знания, будь то собственно математика или кибернетика (теория множеств и математическая логика, алгебра, теория графов и комбинаторика, теория информации, теория формальных языков и языков программирования, синтез управляющих систем и распознавания образов и др.), техника (анализ и конструирование различных устройств коммутации, логического управления и обработки информации, включая современные ЭВМ), экономика, биология или социология. Список областей, где успешно применяются результаты и методы теории булевых функций, может быть продолжен.

В вопросах приложений булевых функций часто встречаются две основные задачи: можно ли представить заданную функцию или заданный класс функций булевыми функциями из имеющегося запаса булевых функций, и если это возможно, то каким образом и с какой сложностью? При этом в качестве выразительных средств очень часто предпочтение имеют различные композиции (суперпозиции) функций.

Рассматривается задача построения счетных классов булевых функций в классе формул и схем из функциональных элементов (ФЭ) в разных базисах и минимальной сложности. Получаемые при этом схемы применяются в дискретных логических устройствах обработки информации и управления, от

сложности которых зависят основные характеристики вычислительной и управляющей техники [1–5].

Используемые обозначения [9–13] следующие: логические операции обозначаются двумя способами: конъюнкция — как "&" или "·" или знак этой операции опускается (точка — знак умножения — может также применяться для обозначения арифметического умножения); отрицание — как надчеркивание над переменной, например,  $\bar{x}$ ;  $\oplus$  — сложение по модулю 2.

### Основные понятия

Пусть  $f^{(n)}$  — логическая функция, зависящая от  $n$  переменных из множества  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ . Под базисом  $G$  понимаем конечную функционально полную систему логических функций (или соответствующих ФЭ). В частности, для всех булевых функций  $P_2$  это стандартный базис  $G_1 = \{\&, \vee, \bar{\phantom{x}}\}$  и базис Жегалкина  $G_3 = \{\&, \oplus, 0, 1\}$ . Считаем, что функция  $f^{(n)}$  задается формулой  $F^{(n)}$  в определенном базисе  $G$ , и формула изоморфна соответствующей схеме  $S$  без ветвления.

В качестве меры сложности представления функции  $f^{(n)}$  формулой  $F$  из функциональных элементов определяем соответствующий показатель  $L_F(f, G)$  — число подформул в  $F$ .  $L'_F$  ( $L''_F$ ,  $L'''_F$ ) — это значение показателя сложности по числу базисных функций в базисе Жегалкина (в стандартном базисе: в классе ДНФ-СДНФ и в классе смешанных формул, полученных в результате перехода из базиса Жегалкина).

### Функциональные уравнения

Рассмотрим примеры разных типов функциональных уравнений (ФУ). Пусть  $g^{(2)}$  — двухместная

булева функция (одна из базисных функций), задающая начальный член  $f^{(2)}$  последовательности изучаемого класса функций  $f^{(n)}$ ,  $n \geq 2$ , и  $h^{(2)}$  — функция рекурсии, входящая в базис  $G$  или представляемая через базисные функции. Тогда рекуррентное соотношение, получаемое на основе операции суперпозиции вида

$$f^{(n)} = h^{(2)}(f^{(n-1)}, x_n), \quad (1)$$

называется **ФУ типа 1** ( $n_1 = n - 1$ ,  $n_2 = 1$ ); вида

$$f^{(n)} = h^{(3)}(f^{(n-2)}, x_{n-1}, x_n), \quad (2)$$

называется **ФУ типа 2** ( $n_1 = n - 2$ ,  $n_2 = 2$ ), где  $h^{(2)}$  — двухместная и  $h^{(3)}$  — трехместная булевы функции и т. д. [10–13].

### Сложность произвольной булевой функции на основе ФУ (канонический случай)

Применим метод ФУ для реализации произвольной булевой функции  $F^{(n)} \in P_2$  в базисе  $G_3$  и получения при этом верхней оценки сложности  $L_F(f^{(n)}, G_3)$ . Суть метода заключается в том, что из множества  $P_2$  выделяются счетные классы булевых функций, наделяемые определенными свойствами. Это можно рассматривать как некоторую классификацию множества  $P_2$ , и, в первую очередь, в работе рассматриваются вопросы минимизации сложности представления по числу используемых базисных функций  $L_F(f^{(n)}, G_3)$  (или адекватных схем из ФЭ).

Булева функция  $f^{(n)}$  зависит от переменных из множества  $X = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_n\}$  и задается полиномом Жегалкина  $F^{(n)} = K_1 \oplus \dots \oplus K_i \oplus \dots \oplus K_m$ , где  $K_i$  — монотонная элементарная конъюнкция ранга  $r_i$ , причем  $r_1 \geq \dots \geq r_i \geq \dots \geq r_m$ ,  $1 \leq i \leq m$ . Вектор  $\mathbf{r} = (r_1, \dots, r_i, \dots, r_m)$  задает строение полинома Жегалкина. При этом определяем еще вектор  $\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_n)$  повторяемости переменных из множества  $X$  в формуле  $F^{(n)}$ , т. е. переменная  $x_i$ ,  $1 \leq i \leq n$ , в формуле  $F^{(n)}$  повторяется  $p_i$  раз.

**Класс  $D_1$**  разбиения множества  $P_2$ . В качестве полинома Жегалкина используем самый сложный полином

$$F^{(n)} = x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_{n-1} x_n \oplus (x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_{n-1} \oplus \dots \oplus x_2 \cdot \dots \cdot x_n) \oplus \dots \oplus (x_1 \oplus x_2 \oplus \dots \oplus x_n) \oplus 1, \\ n = 2, 3, 4, \dots$$

от  $n$  переменных. Обозначим это множество  $D_1 = \{F^{(n)} | n = 2, 3, 4, \dots\}$ . Заметим, что оставшееся множество есть  $P_2' = P_2 D_1$ .

Находим  $p_i = \max(p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_n)$ ,  $1 \leq i \leq n$ . Тогда ФУ (1) имеет вид

$$F^{(n)} = ((x_i \cdot F_0^{(n-1)}) \oplus F_1^{(n-1)}), \quad (3)$$

где нижние индексы 0 и 1 — номера соответствующих остаточных функций, рассматриваемых на

одном множестве  $X' = X \setminus \{x_i\}$ . Будем их записывать, соответственно, как  $F^{(n-1),0}$  и  $F^{(n-1),1}$ .

Применяя к  $F^{(n-1),0}$  и  $F^{(n-1),1}$  ФУ (3) и так далее, получим суперпозиционную формулу  $F_{с.ф.}^{(n)}$ . Каждое применение ФУ (3) порождает не более двух базисных функций из  $G_3$  и не более двух остаточных функций  $F^{(n-1),0}$  и  $F^{(n-1),1}$ . Используем последовательно ФУ (3) и рассматриваем случай, когда остаточные функции совпадают, т. е. случай

$$F^{(n-1),0} = F^{(n-1),1}, \quad n = 2, 3, 4, \dots$$

Пусть  $n = 2$ ,  $F^{(2)} = x_1 \cdot x_2 \oplus x_1 \oplus x_2 \oplus 1$ . Вектор  $\mathbf{r} = (2, 1, 1, 0)$  задает строение полинома Жегалкина; вектор  $\mathbf{p} = (2, 2)$  — повторяемость переменных  $x_1$  и  $x_2$  из множества  $X$  в формуле  $F^{(2)}$ . В силу свойств функции  $f^{(2)}$  ФУ приведем к виду  $F^{(2)} = x_1 \cdot (x_2 \oplus 1) \oplus x_2 \oplus 1$  (здесь можно было выносить и другую переменную, при этом остаточные функции совпадают, т. е.  $F^{(1),0} = F^{(1),1} = x_2 \oplus 1$ ). Формула  $F^{(2)}$  в базисе  $G_3$  принимает вид  $F^{(2)} = (x_1 \oplus 1) \cdot (x_2 \oplus 1)$ , а в базисе  $G_1$  — вид  $F^{(2)} = \overline{x_1 \cdot x_2}$ . Оценки сложности представления в классе формул с учетом базиса  $L_F(F^{(2)}, G_3) = 3$  и  $L_F(F^{(2)}, G_1) = 2$  являются минимальными.

Пусть  $n = 3$ ,  $F^{(3)} = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \oplus x_1 \cdot x_2 \oplus x_1 \cdot x_3 \oplus x_2 \cdot x_3 \oplus x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus 1$  (полином Жегалкина такого вида). Вектор  $\mathbf{r} = (3, 2, 2, 2, 1, 1, 1, 0)$  задает строение полинома Жегалкина; вектор  $\mathbf{p} = (4, 4, 4)$  — повторяемость переменных  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  из множества  $X$  в формуле  $F^{(3)}$ . В силу свойств функции  $f^{(3)}$  ФУ имеет вид  $F^{(3)} = x_1 \cdot (x_2 \cdot x_3 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus 1) \oplus (x_2 \cdot x_3 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus 1)$ . Здесь можно было выносить за скобки и другие переменные, при этом остаточные функции совпадают, т. е.  $F^{(2),0} = F^{(2),1} = (x_2 \cdot x_3 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus 1)$ . Формула  $F^{(3)}$  в базисе  $G_3$  принимает вид  $F^{(3)} = (x_1 \oplus 1) \cdot (x_2 \oplus 1) \cdot (x_3 \oplus 1)$ , а в базисе  $G_1$  — вид  $F^{(3)} = \overline{x_1 \cdot x_2 \cdot x_3}$ . Оценки сложности представления в классе формул с учетом базиса  $L_F(F^{(3)}, G_3) = 5$  и  $L_F(F^{(3)}, G_1) = 3$  являются минимальными.

Индукцией по  $n$  доказывается минимальность следующих оценок сложности показателей в базисе  $G_1$  и в базисе  $G_3$  для функций из класса  $D_1$ :

$$\min L_F(F^{(n)}, G_3) = 2n - 1; \quad \min L_F(F^{(n)}, G_1) = n.$$

**Класс  $D_2$**  разбиения множества  $P_2$ . Рассматриваем случай, когда имеются несовпадающие остаточные функции, т. е. в общем случае  $F^{(n-1),0} \neq F^{(n-1),1}$ ,  $n = 2, 3, 4, \dots$ . Тогда для каждой остаточной функции таким образом (см. ФУ (3)) делаем итерации для каждого  $n = 2, 3, 4, \dots$  и подсчитываем получаемую сложность.

При этом выводим верхнюю оценку сложности  $L_F$  для общего случая (для указанного выше):

$$L_F(F^{(n)}, G_3) \leq (5/4) \cdot 2^n - 2. \quad (4)$$

Заметим, что рекуррентное соотношение (3) применяется для получения суперпозиционной формулы  $F_{с.ф}^{(n)}$  (конструктивно), а соотношение (4) — для получения соответствующей оценки сложности формулы  $L_F(F_{с.ф}^{(n)}, G_3)$ .

Погрешность получаемой оценки (4) может быть большой [11—13]. Поэтому для рассматриваемой минимизации представления функции выполняются шаги на основе ФУ (3) (опишем одну итерацию): рассмотрим принципиально функционирование предлагаемого алгоритма, позволяющего численно получать верхнюю оценку или минимальное значение показателя сложности  $L_F$  на основе ФУ (3) в базисе  $G_3$ .

#### Алгоритм 1 (упрощенный)

**Шаг 1.** Для формулы  $F^{(n)}$  получить переменную  $x_i$  (максимально повторяющуюся).

**Шаг 2.** Преобразовать формулу  $F^{(n)}$  к виду (3), получая остаточные функции  $F^{(n-1),0}$  и  $F^{(n-1),1}$ .

**Шаг 3.** Записать формулы  $F^{(n-1),0}$  и  $F^{(n-1),1}$  в конец специальной таблицы, а из ее начала выбирать формулу для шага 1.

Шаги 1—3 выполняются до тех пор, пока в таблице имеется хотя бы одна остаточная функция.

Таким образом, исходная функция (и получаемые остаточные)  $F^{(n)}$ , в общем случае, разбивается на две более простые по сравнению с ней и две базисные (двухместные), соединяющие первые функции и выделяемую переменную  $x_i$  в одну формулу. Процесс продолжается, пока все остаточные функции таким образом (на основе декомпозиции) не перейдут в разряд реализованных. Так будет получена суперпозиционная формула  $F_{с.ф}^{(n)}$  и оценка  $L_F(F_{с.ф}^{(n)}, G_3)$ . По формуле  $F_{с.ф}^{(n)}$  изоморфным образом строится схема  $S$  без ветвления, не исключая возможности устранения на следующем этапе синтеза этого пробела.

Заметим, что вначале по мере выполнения алгоритма 1 число остаточных функций, как правило, удваивается, а сами функции упрощаются. При этом число базисных функций, соединяющих их в одну формулу, увеличивается. Обсуждаемый алгоритм 1 на основе ФУ (3) относится к алгоритмам градиентного типа, он позволяет строить формулу  $F_{с.ф}^{(n)}$ , реализующую функцию  $f^{(n)}$ , возможно, с минимальным значением показателя  $L_F$ , за число шагов  $j$ ,  $1 \leq j < n$ .

Для более эффективного применения ФУ используется:

- классификация булевых функций (входных данных) и разработка для каждого класса определенных методов;
- математико-информационные специальные матрицы для минимизации вычислительной сложности при работе с полиномами Жегалкина;
- строение полинома;
- векторы повторения переменных в полиноме. Особенностью алгоритма является использование на каждом шаге переменной с максимальной повторяемостью.

#### Конструирование счетных классов булевых функций с минимальной сложностью в определенных базисах

Решение задачи получения оценок сложности представления произвольной булевой функции для разных базисов можно находить разными методами. Например, можно использовать теорему С. В. Яблонского о полноте системы булевых функций, позволяющую сводить вопрос о полноте одних систем к вопросу о полноте других систем, т. е. можно получать оценки  $L_F$  сложности функций в других базисах [5]. Или можно использовать метод конструирования счетных множеств функций из класса булевых функций  $D_2$  [11—13]. Рассмотрим второй вариант. Напомним, что через  $m$ ,  $m \leq n$ , обозначаем длину формул  $F^{(n)}$ , записанных в виде ДНФ, полинома Жегалкина и др.

Продолжаем изучать полиномы Жегалкина вида  $F^{(n)} = K_1 \oplus \dots \oplus K_i \oplus \dots \oplus K_m$ , где  $K_1$  — монотонная элементарная конъюнкция ранга  $r_1 \geq 2$ ;  $K_2, \dots, K_m$  — элементарные конъюнкции ранга  $r_i = 1$ ,  $i = 2, 3, \dots, m$  (методы ограничений).

Выделяем их счетное множество. Множество таких множеств также является счетным. Преобразуем представление булевых функций из базиса Жегалкина в стандартный базис, и оценки сложности представления функции в базисе Жегалкина  $G_3$  эквивалентно преобразуем для представления ее в стандартном базисе  $G_1$ .

Рассматриваем разные случаи.

- ♦ Пусть фиксирована длина полинома  $m = 2$ .
- Число переменных  $n = 2$ : представление в базисе Жегалкина  $f^{(2)} = F_{Жег}^{(2)}(x_1, x_2) = x_1 \oplus x_2$ , и значение сложности  $L'_F(F_{Жег}^{(2)}) = 1$  (в базисе  $G_3$ ).

Для стандартного базиса  $G_1$  получаем  $f^{(2)} = F_{Форм}^{(2)}(x_1, x_2) = F_{СДНФ}^{(2)}(x_1, x_2) = x_1 \oplus x_2 = \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot \bar{x}_2$  и подсчитываем сложность  $L''_F(F_{СДНФ}^{(2)}) = L'''_F(F_{Форм}^{(2)}) = 5$  (в базисе  $G_1$ ).

- Случай  $n = 3$ :  $f^{(3)} = F_{\text{Жег}}^{(3)}(x_1, x_2, x_3) = x_1 x_2 \oplus x_3$  и значение показателя сложности  $L'_F(F_{\text{Жег}}^{(3)}) = 2$  (в базисе  $G_3$ ). После преобразования в формулу в базисе  $G_1$  получаем  $f^{(3)}(x_1, x_2, x_3) = F_{\text{Форм}}^{(3)}(x_1, x_2, x_3) = x_1 \cdot x_2 \oplus x_3 = \overline{x_1 \cdot x_2} \cdot x_3 \vee x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3$ , и значение сложности  $L'''_F(F_{\text{Форм}}^{(3)}) = 7$ . Продолжая преобразования, получаем ДНФ  $F_{\text{ДНФ}}^{(3)}(x_1, x_2, x_3) = x_1 \cdot x_2 \oplus x_3 = \bar{x}_1 \cdot x_3 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3 \vee x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3$ , и значение сложности  $L''_F(F_{\text{СДНФ}}^{(3)}) = 9$  (в последней формуле отрицаний 3, конъюнкций 4, дизъюнкций 2). Получаемые здесь формулы — это дизъюнктивные нормальные формы (ДНФ, включая класс совершенных СДНФ) и смешанные формулы, иногда также относящиеся к ДНФ.

Таким образом, устанавливается связь между сложностью представления одной функции  $f^{(n)}$  в базисах  $G_3$  и  $G_1$ .

- Случай  $n = 4$ : аналогично для функции  $f^{(4)}$ , задаваемой полиномом Жегалкина  $F_{\text{Жег}}^{(4)}(x_1, x_2, x_3, x_4) = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \oplus x_4$ , получаем значение сложности  $L'_F(F_{\text{Жег}}^{(4)}) = 3$  в базисе  $G_3$ . Представляя ее в классе формул  $F_{\text{Форм}}^{(4)}(x_1, x_2, x_3, x_4) = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \oplus x_4 = \overline{x_1 \cdot x_2 \cdot x_3} \cdot x_4 \vee x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \bar{x}_4$  базиса  $G_1$ , получаем  $L'''_F(F_{\text{Форм}}^{(4)}) = 9$ . В классе ДНФ получаем  $F_{\text{ДНФ}}^{(4)}(x_1, x_2, x_3, x_4) = \bar{x}_1 \cdot x_4 \vee x_2 \cdot x_4 \vee x_3 \cdot x_4 \vee x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \bar{x}_4$  и значение показателя сложности  $L''_F(F_{\text{ДНФ}}^{(4)}) = 13$ .

- Случай  $n = 5$ : для функции  $f^{(5)}$ , задаваемой полиномом Жегалкина  $F_{\text{Жег}}^{(5)}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \oplus x_5$ , получаем  $L'_F(F_{\text{Жег}}^{(5)}) = 4$ .

Для представления в классе формул  $F_{\text{Форм}}^{(5)}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \oplus x_5 = \overline{x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4} \cdot x_5 \vee x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot \bar{x}_5$  получаем  $L'''_F(F_{\text{Форм}}^{(5)}) = 11$ , и для представления в классе ДНФ  $F_{\text{ДНФ}}^{(5)}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = \bar{x}_1 \cdot x_5 \vee \bar{x}_2 \cdot x_5 \vee \bar{x}_3 \cdot x_5 \vee \bar{x}_4 \cdot x_5 \vee x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot \bar{x}_5$  получаем  $L''_F(F_{\text{ДНФ}}^{(5)}) = 17$ .

Итого, для рассмотренного счетного класса 1 ( $r_1 \geq 2$ ;  $m = 2$ ) булевых функций оценки минимальной сложности, соответственно, в базисах  $G_3$  и  $G_1$  имеют вид

$$\begin{aligned} L'_F(F_{\text{Жег}}^{(n)}) &= n - 1, \quad L''_F(F_{\text{ДНФ}}^{(n)}) = 4n + 1 \text{ и} \\ L'''_F(F_{\text{Форм}}^{(n)}) &= 2n + 3 \end{aligned} \quad (5)$$

(доказывается методом индукции). Тогда

$$\begin{aligned} L'''_F(F_{\text{Форм}}^{(n)}) / L'_F(F_{\text{Жег}}^{(n)}) &= ((2n + 3)/(n - 1)) \sim 2 \\ \text{при } n \rightarrow \infty; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} L''_F(F_{\text{ДНФ}}^{(n)}) / L'_F(F_{\text{Жег}}^{(n)}) &= ((4n + 1)/(n - 1)) \sim 4 \\ \text{при } n \rightarrow \infty. \end{aligned} \quad (7)$$

Этот конструктивный подход можно применить для получения более "широкого" счетного класса ( $n \in \mathbb{N}$ ,  $m \geq 2$ ) булевых функций. Заметим, что результат (5) можно улучшить, детально рассматривая случаи в классе формул  $F^{(n)}$  над базисом  $G'_1$ .

Для рассмотренных случаев  $n \in \{3, 4, 5, 6\}$  в общем виде получаем уменьшенную оценку  $L'''_F(F_{\text{Форм}}^{(n)}) = 2n + 3$  (дополнительно к  $L''_F = 4n + 1$ ), также доказываемую методом индукции.

Для этого же  $m = 2$  сформулируем требования к конструированию других классов, например, класса 2 со значениями параметров: ( $r_1, r_2 \rightarrow \infty$ ,  $r_i = 1$ ,  $i \geq 3$ ). Результат получается аналогично предыдущему (см. таблицу).

- ♦ Пусть  $m = 3$ .

- Случай  $n = 3$ :  $f^{(3)} = F_{\text{Жег}}^{(3)}(x_1, x_2, x_3) = x_1 \oplus x_2 \oplus x_3$ , значение показателя сложности  $L'_F(F_{\text{Жег}}^{(3)}) = 2$  (в базисе  $G_3$ ); после преобразования в формулу в базисе  $G_1$  получаем  $f^{(3)} = F_{\text{Форм}}^{(3)}(x_1, x_2, x_3) = (x_1 \oplus x_2) \oplus x_3 = f^{(3)}(x_1, x_2) \oplus x_3$  и значение сложности  $L''_F(F_{\text{ДНФ}}^{(3)}) = 17$ . Продолжая преобразования, в классе СДНФ получаем:

$$\begin{aligned} f_{\text{СДНФ}}^{(3)}(x_1, x_2, x_3) &= x_1 x_2 x_3 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 \vee \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3 \vee \\ &\vee x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \dots \text{ и } L''_F(f_{\text{СДНФ}}^{(3)}) = 17. \end{aligned}$$

- Случай  $n = 4$ :

$$\begin{aligned} f_{\text{Жег}}^{(4)}(x_1, x_2, x_3, x_4) &= x_1 x_2 \oplus x_3 \oplus x_4 = \\ &= x_1 x_2 \oplus f^{(2)}(x_3, x_4), \quad L'_F(f_{\text{Жег}}^{(4)}) = 3; \end{aligned}$$

m	n	$F^{(n)}, G_3$	$L'_F(F^{(n)}, G_3)$	$G_1$	
				$L''_F(F^{(n)}, G_1)$ Класс ДНФ, СДНФ	$L'''_F(F^{(n)}, G_1)$ Класс формул
1	2	3	4	5	6
2	2	$F^{(2)} = x_1 \oplus x_2$	1	$y_1 = 5$ начальное условие	$y_1 = 5$
	3	$F^{(3)} = x_1x_2 \oplus x_3$	2	$y_2 = 9$	$y_2 = 7$
	4	$F^{(4)} = x_1x_2x_3 \oplus x_4$	3	13	9
	5	$F^{(5)} = x_1x_2x_3x_4 \oplus x_5$	4	17	11
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	n	$F^{(n)} = x_1 \dots x_{n-1} \oplus x_n$	$L'_F = n - 1$	$L''_F = 4n + 1$	$L'''_F = 2n + 3$
2	2	$F^{(2)} = x_1 \oplus x_2$	1	5	5
	3	$F^{(3)} = x_1x_3 \oplus x_2$	2	9	7
	4	$F^{(4)} = x_1x_3 \oplus x_2x_4$	3	15	9
	5	$F^{(5)} = x_1x_3x_5 \oplus x_2x_4$	4	21	11
	6	$F^{(6)} = x_1x_3x_5 \oplus x_2x_4x_6$	5	29	13
	n	$F^{(n)} = x_1 \dots x_{2n-1} \oplus x_2 \dots x_{2n}$	$L'_F = n - 1$	⋮	$L'''_F = 2n + 3$
3	3	$F^{(3)} = x_1 \oplus x_2 \oplus x_3$	2	$y_1 = 17$	—
	4	$F^{(4)} = x_1x_2 \oplus x_3 \oplus x_4$	3	$y_2 = 39$	—
	5	$F^{(5)} = x_1x_2x_3 \oplus x_4 \oplus x_5$	4	$y_3 = 83$	—
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	n	$F^{(n)} = x_1 \dots x_{n-2} \oplus x_{n-1} \oplus x_n$	⋮	$y_n = 2 \cdot y_{n-1} + 5$	—
4	4	$F^{(4)} = (x_1 \oplus x_2) \oplus (x_3 \oplus x_4)$	3	$y_1 = 47$	—
	5	$F^{(5)} = (x_1x_2 \oplus x_3 \oplus x_4) \oplus x_5$	4	99	—
	6	$F^{(6)} = (x_1x_2 \oplus x_3x_4 \oplus x_5) \oplus x_6$	5	203	—

$$f_{\text{ДНФ}}^{(4)}(x_1, x_2, x_3, x_4) = x_1x_2x_3x_4 \vee \overline{x_1x_3}x_4 \vee \overline{x_2x_3}x_4 \vee \overline{x_1}x_3\overline{x_4} \vee \overline{x_2}x_3\overline{x_4} \vee x_1x_2\overline{x_3}\overline{x_4};$$

$$L''_F(F_{\text{ДНФ}}^{(4)}) = 39.$$

- Случай  $n = 5$ :

$$f_{\text{ДНФ}}^{(5)}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = (x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus x_4) \oplus x_5 = \dots,$$

$$L''_F(F_{\text{ДНФ}}^{(5)}) = 83.$$

- ♦ Пусть  $m = 4$ .
- Случай  $n = 4$ :

$$f_{\text{Жег}}^{(4)}(x_1, x_2, x_3, x_4) = (x_1 \oplus x_2) \oplus (x_3 \oplus x_4),$$

$$L'_F(f_{\text{Жег}}^{(4)}) = 3,$$

$$f_{\text{ДНФ}}^{(4)}(x_1, x_2, x_3, x_4) = (x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus x_4) = x_1x_2x_3x_4 \vee \overline{x_1x_3}x_4 \vee \overline{x_2x_3}x_4 \vee \overline{x_1}x_3\overline{x_4} \vee \overline{x_2}x_3\overline{x_4} \vee x_1x_2\overline{x_3}\overline{x_4}, L''_F(F_{\text{ДНФ}}^{(4)}) = 47.$$

- Случай  $n = 5$ :

$$f_{\text{Жег}}^{(5)}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = (x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus x_4) \oplus x_5,$$

$$L'_F(f_{\text{Жег}}^{(5)}) = 4,$$

$$f_{\text{ДНФ}}^{(5)}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = (x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus x_4) \oplus x_5 = \dots,$$

$$L''_F(F_{\text{ДНФ}}^{(5)}) = 99.$$

- Случай  $n = 6$ :

$$f_{\text{Жег}}^{(6)}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) =$$

$$(x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus x_4 \oplus x_5) \oplus x_6, L'_F(f_{\text{Жег}}^{(6)}) = 5,$$

$$f_{\text{ДНФ}}^{(6)}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) =$$

$$=(x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus x_4 \oplus x_5) \oplus x_6 = \dots, L''_F(F_{\text{ДНФ}}^{(6)}) = 203.$$

Получаемые результаты представлены в таблице. Уже случай  $m = 4, n = 5$  представляет значительную трудоемкость в получении оценки значений показателя сложности  $L_F$  в базисе  $G_1$ . Поэтому ниже

предлагается вычислительный метод получения сложности представления функции в виде СДНФ, ДНФ или формулы  $F^{(n)}$  над базисом  $G_1$ .

### О вычислительном методе определения оценки сложности

При разработке вычислительного метода определения оценки сложности использована некоторая формализация рассмотренных примеров. Предложенный метод, реализуемый на разного рода специализированных и универсальных ЭВМ, записывается в командах условного алгоритмического языка: команды задаются аналитически или вербально; группа команд оканчивается символом "." (точка); в группе между собой команды разделяются символом ";". Некоторые пояснения к шагам алгоритма следует воспринимать и как исполняемые команды. Протокол выполнения алгоритма 2 подтверждает его работоспособность.

Формализация предполагает определение правил выбора значений параметров для конструируемых счетных классов булевых функций (определяя параметры, получаем шаблоны счетных классов  $(r_1 \geq 2, m = 2)$ ;  $(r_1, r_2 \geq 3, m = 3)$ ; ...;  $(r_1 \in N; m \rightarrow \infty)$ ;  $(r_1, r_2 \geq 2; m \rightarrow \infty)$ ; ...  $(r_1, r_2 \rightarrow \infty, r_i = 1, i \geq 3)$ ).

В общем случае для функций  $f^{(n)}$  из этих классов вычисляем значения их показателей сложности  $L_F$  специальным способом, а также на основе алгоритма 2.

**Алгоритм 2.** Получение верхней оценки показателя сложности  $L_F$ .

**Шаг 1.** Для полинома Жегалкина  $F_{Жег}^{(n)}$  получаем табличный способ задания булевой функции  $f^{(n)}$ .

**Шаг 2.** На основе полученной таблицы находим СДНФ  $F_{СДНФ}^{(n)}$ .

**Шаг 3.** По СДНФ  $F_{СДНФ}^{(n)}$  численно получаем верхнюю оценку  $L_F(F_{СДНФ}^{(n)})$  сложности представления булевой функции, задаваемой полиномом Жегалкина  $F_{Жег}^{(n)}$ .

Булевы функции "&" и "⊕" также исследованы в работах [9–13].

### Выводы

На основе проводимого исследования получаем счетные множества классов функций, которые, в

свою очередь, также являются счетными множествами. При этом подсчитываем сложность этих функций.

Проблема выводимости верхней оценки сложности  $L_F$  представления булевой функции  $f^{(n)}$  разрешима:

- на основе ФУ в базисе  $G_3$ ;
- как сложность СДНФ в базисе  $G_1$ ;
- как сложность функций из счетных множеств над базисами  $G_1$  и  $G_3$ .

Предложенное исследование относится к множеству всех функций из  $P_2$ .

### Список литературы

1. Журавлев Ю. И. Теоретико-множественные методы в алгебре логики // Проблемы кибернетики. 1962. № 8.
2. Журавлев Ю. И. Алгоритм построения минимальных дизъюнктивных нормальных форм для функций алгебры логики // Дискретная математика и математические вопросы кибернетики. М.: Наука, 1974.
3. Лупанов О. Б. О сложности реализации функций алгебры логики формулами // Проблемы кибернетики. Вып. 3. М.: Физматгиз, 1960.
4. Яблонский С. В. Введение в дискретную математику. М.: Наука, 1986.
5. Гаврилов Г. П., Сапоженко А. А. Сборник задач по дискретной математике. М.: Наука, 1977.
6. Успенский В. А. Лекции о вычислимых функциях. М.: Физматлит, 1960.
7. Мальцев А. И. Алгоритмы и рекурсивные функции. М.: Наука, 1965.
8. Закревский А. Д. Параллельные алгоритмы логического управления. 3-е изд. М.: Эдиториал УРСС, 2012. 200 с.
9. Чебурахин И. Ф. Преобразования функциональных уравнений и показатели сложности булевых функций // Матер. IX Междунар. семинара "Дискретная математика и ее приложения", посвященного 75-летию со дня рождения академика О. Б. Лупанова. М.: Изд-во МГУ, 2007. С. 126–129.
10. Чебурахин И. Ф. Математические модели для интеллектуализации синтеза дискретных логических управляющих устройств на основе цифровых интегральных схем // Изв. РАН. ТиСУ. 2008. № 1. С. 68–77.
11. Чебурахин И. Ф. О минимизации сложности представления булевых функций из некоторых классов "Интеллектуальные системы и компьютерные науки" // X Междунар. конф.: Москва, 5–10 декабря 2011 г. Сб. материалов / Под общ. ред. Садовниченко В. А., Кудрявцева В. Б., Михалева А. В. М.: МАКС Пресс, 2011. С. 311–314.
12. Чебурахин И. Ф. Алгоритмизация представления булевых функций формулами и схемами минимальной сложности в базисе Жегалкина // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 12. С. 7–14.
13. Чебурахин И. Ф. О логическом управлении и обработке информации в дискретных технических системах на основе функциональных уравнений // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 11. С. 9–16.

## Automating the Designing of Certain Countable Classes of Boolean Functions and Minimization of Complexity

*It is offered constructive method of the syntheses superpositional formulas (circuits of their functional element) to obtain on base of the functional equations analytically upper value estimations of the difficulty index by count of basis functions (functional elements), etc. It is contained a comparison of complexities of the functions of individual countable classes in the standard basis and Zhegalkin basis. Division into classes based on differences in the internal structure of the polynomial.*

*We considered the problem of constructing countable classes of Boolean functions in the class of formulas and schemes of functional elements in different basis and minimum complexity. Obtained scheme are applied in discrete logic devices for information processing and management, the main characteristics of the computing and control techniques depend upon their complexity.*

**Keywords:** counting classes of Boolean functions, functional equations, complexity measures, minimization, synthesis formulas (circuits of functional elements) decomposition

### References

1. Zhuravlev J. I. Teoretiko-mnozhestvennye metody v algebre logiki. *Problemy kibernetiki*. 1962. N. 8.
2. Zhuravlev J. I. Algoritm postroenija minimal'nyh dizjunktivnyh normal'nyh form dlja funkcij algebry logiki. *Diskretnaja matematika i matematicheskie voprosy kibernetiki*. M.: Nauka, 1974.
3. Lupanov O. B. O slozhnosti realizacii funkcij algebry logiki formulami. *Problemy kibernetiki*. V. 3. M.: Fizmatgiz, 1960.
4. Jablonskij S. V. Vvedenie v diskretnuju matematiku. M.: Nauka, 1986.
5. Gavrilov G. P., Sapozhenko A. A. Sbornik zadach po diskretnoj matematike. M.: Nauka, 1977.
6. Uspenskij V. A. Lekcii o vychislimyh funkcijah. M.: Fizmatlit, 1960.
7. Mal'cev A. I. Algoritmy i rekursivnye funkcii. M.: Nauka, 1965.
8. Zakrevskij A. D. Parallel'nye algoritmy logicheskogo upravlenija. 3th ed. M.: Jeditorial URSS, 2012. 200 p.
9. Cheburahin I. F. Preobrazovaniya funkcional'nyh uravnenij i pokazateli slozhnosti bulevykh funkcij. *Mater. IX Mezhdunar. seminara*

*"Diskretnaja matematika i ee prilozhenija", posvjashhennogo 75-letiju so dnja rozhdenija akademika O. B. Lupanova*. M.: MGU, 2007. P. 126—129.

10. Cheburahin I. F. Matematicheskie modeli dlja intellektualizacii sinteza diskretnykh logicheskikh upravljajushhih ustrojstv na osnove cifrovyykh integral'nykh shem. *Izv. RAN. TiSU*. 2008. N. 1. P. 68—77.

11. Cheburahin I. F. O minimizacii slozhnosti predstavlenija bulevykh funkcij iz nekotorykh klassov "Intellektual'nye sistemy i komp'yuternye nauki". *X Mezhdunar. konf.: Moscow, 5—10 dekabnja 2011 g.* Sb. materialov. Pod obshh. red. Sadovnichego V. A., Kudrjavceva V. B., Mihaleva A. V. M.: MAKS Press, 2011. P. 311—314.

12. Cheburahin I. F. Algoritmizacija predstavlenija bulevykh funkcij formulami i shemami minimal'noj slozhnosti v bazise Zhegalkina. *Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie*. 2012. N. 12. P. 7—14.

13. Cheburahin I. F. O logicheskom upravlenii i obpabotke informacii v diskretnykh tehniceskikh sistemah na osnove funkcional'nykh upravnenij. *Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie*. 2013. N. 11. P. 9—16.

УДК 681.5

Аль-Сабул Али Хуссейн Хасан<sup>1, 2</sup>, аспирант, ali\_hussen\_hassan@yahoo.com,

А. Н. Грачев<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц., ga150161@mail.ru,

<sup>1</sup> Тульский государственный университет, Тула, Россия,

<sup>2</sup> Дхикарский (Сомрский) университет, Дхикар, Аль-Рифайи, Ирак

## Параметрическая идентификация линейных динамических объектов с использованием быстрого генетического алгоритма<sup>1</sup>

*Предлагается специально разработанный быстрый генетический алгоритм на основе резервной элитной популяции, который может быть использован для параметрической идентификации линейных динамических объектов управления. Результаты имитационного моделирования показывают, что предложенный подход значительно уменьшает среднее число поколений, необходимых генетическому алгоритму для нахождения приемлемого решения, в результате чего сокращается общее время оптимизации. Это дает возможность использовать данные алгоритмы в системах идентификации реального времени.*

**Ключевые слова:** генетические алгоритмы, резервная элитная популяция, линейные динамические объекты управления, параметрическая идентификация

### Введение

В последнее время разработчики различных систем управления, в том числе и мехатронных, все

больше внимания уделяют вопросам адаптации [1—4], т. е. оперативной коррекции алгоритмов управления электроприводом, решение которых возможно только при проведении идентификации параметров моделей в режиме реального времени. Как известно [5], для оценивания параметров математической модели динамических объектов приме-

<sup>1</sup> Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 13-07-00527.

няются различные методы параметрической идентификации: в частотной и временной областях, с явными или неявными идентифицирующими моделями и т. п. С использованием этих методов в той или иной степени успешно решают различные задачи параметрической идентификации.

Однако в последнее время все более широкое распространение начинают приобретать нетрадиционные методы решения классических задач идентификации. Одним из таких новых подходов к решению задач параметрической идентификации и адаптации является использование так называемых генетических алгоритмов [6—9]. Генетические алгоритмы (ГА) в настоящее время представляют собой перспективное и динамично развивающееся направление интеллектуальной обработки данных, связанное с решением задач поиска и оптимизации [10—14].

Главным достоинством ГА как методов оптимизации, а следовательно, и идентификации являются их универсальность, низкие требования к объему необходимой априорной информации, а также принципиальная возможность оптимизации неунимодальных функций. Главным же недостатком ГА при решении задач идентификации в реальном масштабе времени является их низкая вычислительная эффективность, причина которой кроется в том, что они в отличие от классических алгоритмов идентификации (градиентных методов, метода наименьших квадратов, стохастической аппроксимации и т. п.), по сути, являются не последовательными, а параллельными процедурами, осуществляющими одновременную настройку нескольких моделей (т. е. особей в популяции) на каждом шаге измерений [6—9].

Поэтому следует признать актуальной разработку таких ГА, которые обеспечивали бы приемлемое решение задач параметрической идентификации в системах реального времени и при этом существенно экономили бы их вычислительные ресурсы.

В статье предлагается быстрый ГА, в котором за счет наличия специальной резервной элитной популяции удастся значительно сократить время поиска приемлемых решений на отдельных шагах измерений по сравнению с классическим ГА, что делает этот алгоритм удобным для использования в задачах реального времени. В этом случае освобождается значительная часть интервала времени между текущими измерениями, которая может быть использована для выполнения других важных параллельных задач реального времени.

### Постановка задачи параметрической идентификации

Управляемые движения широкого класса мехатронных систем и роботов [1, 2] могут быть описаны

линейными дискретными разностными уравнениями вида

$$y(k) = - \sum_{i=1}^p a_i y(k-i) + \sum_{j=0}^q b_j x(k-j), \quad (1)$$

где  $y(k)$  — выходной сигнал объекта;  $x(k)$  — входной сигнал объекта;  $a_i$  и  $b_j$  — параметры разностного уравнения;  $p$  и  $q$  — структурные параметры модели.

Модель (1) может быть также представлена в частотной области с помощью  $z$ -передаточной функции

$$W(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_q z^{-q}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_p z^{-p}}. \quad (2)$$

Предположим, что выходной сигнал объекта (1) измеряется с аддитивным белым шумом с нулевым средним и ограниченной дисперсией:

$$y_M(k) = y(k) + v(k). \quad (3)$$

Тогда задача параметрической идентификации объекта управления (1) с учетом измерений выхода (3) может быть сформулирована как задача минимизации текущей квадратичной функции потерь (функции приспособленности в терминологии эволюционных вычислений) вида

$$e(k) = \{y_M(k) - \tilde{y}(k)\}^2 \quad (4)$$

с использованием быстрого ГА, как это показано на рис. 1. Здесь  $\tilde{y}(k)$  — выходной сигнал идентифицируемой модели.

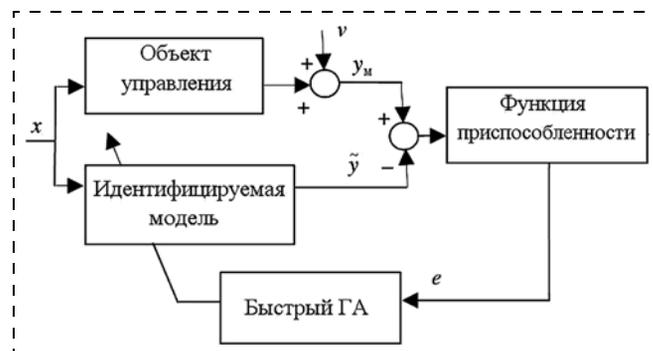


Рис. 1. Структурная схема процесса идентификации с использованием быстрого ГА

### Быстрый генетический алгоритм на основе резервной элитной популяции

Предлагаемый генетический алгоритм, как показано на рис. 2, включает в себя следующие основные шаги.

1. Задание ключевых параметров ГА.

Изначально задаются важнейшие параметры ГА: NIND — число особей (хромосом) в каждом поколении; MAXELIT — максимальное число элитных особей (хромосом) в элитной популяции; MAXGEN —

максимальное число поколений на каждом шаге оптимизации;  $\varepsilon$  — заданная точность оптимизации целевой функции (некоторое малое положительное число);  $P_c$  — вероятность кроссовера;  $P_m$  — вероятность мутации.

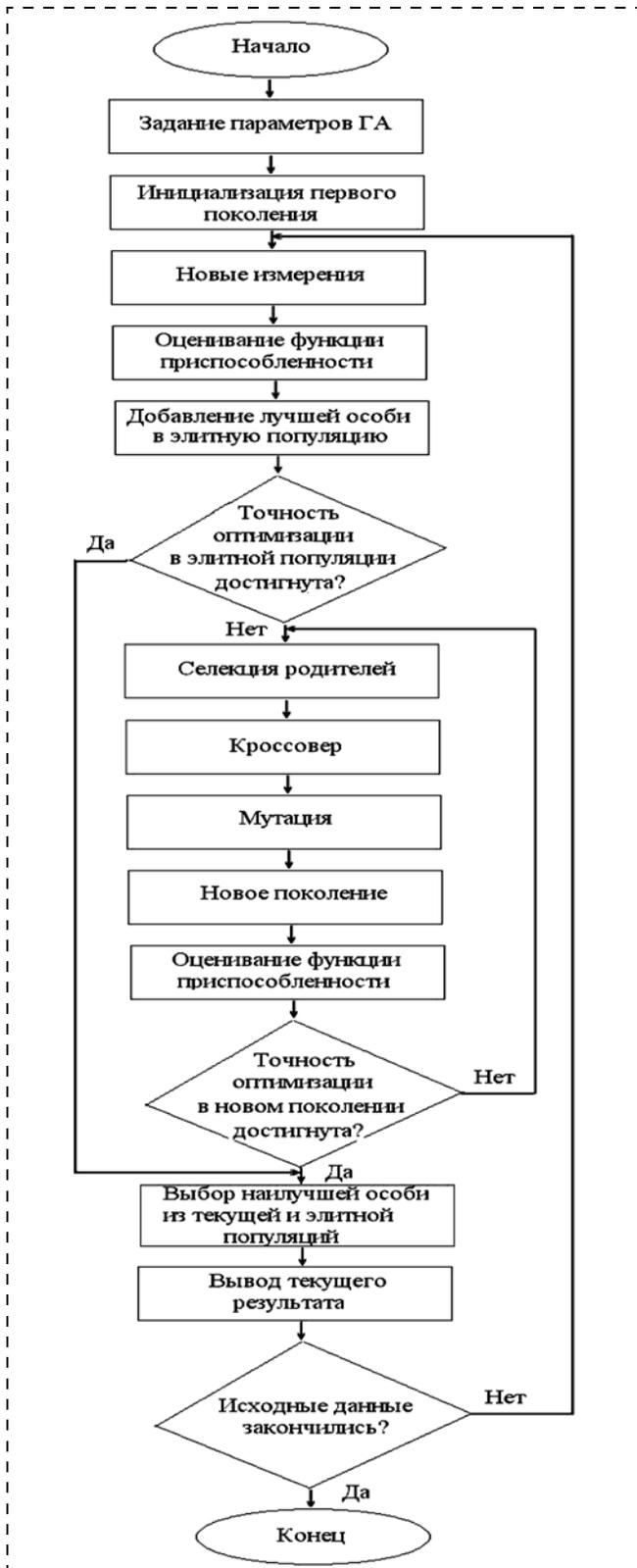


Рис. 2. Схема быстрого генетического алгоритма

## 2. Инициализация первого поколения.

Инициализация первого поколения, состоящего из числа особей, равного параметру NIND, проводится путем случайного выбора генов — действительных чисел из некоторой области, которой должен принадлежать соответствующий элемент искомого решения (хромосомы):

$$B_k^l \leq \theta_k \leq B_k^u, \forall k \in [1, 2, \dots, M], \quad (5)$$

где  $M$  — число элементов (генов) в решении (хромосоме);  $B_k^l$  и  $B_k^u$  — нижняя и верхняя границы  $k$ -го элемента решения.

Заметим, что подобная схема кодирования с использованием действительных чисел экономит память и повышает скорость обработки данных [10, 12–13].

## 3. Новые измерения.

Новые измерения (3) выполняются для уточнения текущих значений функции приспособленности (4) в задачах реального времени.

## 4. Оценка приспособленности каждой особи в поколениях.

Для каждой особи в текущем поколении по формуле (4) рассчитывается функция приспособленности.

## 5. Добавление лучшей особи в резервную элитную популяцию.

Резервная элитная популяция, имеющая размер, равный параметру MAXELIT, в ходе работы алгоритма постоянно формируется из особей с наилучшими функциями приспособленности. Изначально, т. е. на самом первом шаге работы алгоритма, резервная элитная популяция может быть полностью заполнена, например, особью, имеющей наилучшую функцию приспособленности в самом первом поколении. Далее, если у особи из текущей популяции, имеющей наилучшую функцию приспособленности, эта функция оказывается лучше, чем текущие функции приспособленности одной или нескольких особей из резервной элитной популяции, то эта особь заменяет собой особь, имеющую наихудшую текущую функцию приспособленности в элитной популяции.

## 6. Проверка условия завершения оптимизации по резервной элитной популяции.

Решение о завершении процедуры поиска приемлемого решения на текущем шаге измерений алгоритма и выводе полученных результатов принимается, если в резервной элитной популяции находится хотя бы одна такая особь, функция приспособленности (4) которой оказывается лучше, чем заданная точность оптимизации ( $\varepsilon$ ). Если таких особей оказывается несколько, то, естественно, выбирается особь с наилучшей функцией приспособленности. В противном случае принимается решение о выполнении основных этапов классического ГА.

## 7. Классический ГА (внутренний цикл на рис. 2).

Классический ГА, как известно, состоит из следующих основных этапов [10–13]: селекции (вы-

бора) родителей — особей, наиболее подходящих для участия в создании нового поколения (рекомбинации); кроссовера — обмена генами в ходе рекомбинации (выполняемого с вероятностью  $P_c$ ); мутации — процесса случайного изменения отдельных генов, который служит для сохранения генетического разнообразия особей в популяции на протяжении всего времени работы ГА (выполняемой с вероятностью  $P_m$ ); формирования нового поколения и оценивания для входящих в него особей их функций приспособленности.

В качестве алгоритма селекции поколения родителей предлагается использовать метод рулетки, основанный на линейном ранжировании [14]. При таком подходе все особи текущего поколения сначала упорядочиваются в соответствии со значением своей функции приспособленности путем присвоения им специального рейтинга, который рассчитывается по формуле [14]

$$\text{Rank}_i = 2 - \text{SP} + 2,0 \cdot (\text{SP} - 1) \frac{i - 1}{\text{NIND} - 1},$$

$$i = 1, 2, \dots, \text{NIND}, \quad (6)$$

где  $i$  — номер особи в упорядоченном относительно функции приспособленности поколении (особь с наихудшей функцией приспособленности имеет номер  $i = 1$ , а с наилучшей —  $i = \text{NIND}$ );  $\text{SP}$  — так называемый параметр "селективного давления", выбираемый в диапазоне  $1,0 \leq \text{SP} \leq 2,0$  [14]. Предлагается выбирать этот параметр равным 2, тогда особь с наихудшей функцией приспособленности будет иметь рейтинг, равный 0, а с наилучшей — равный 2. Далее родительские особи выбираются из текущего поколения путем "запуска рулетки"  $\text{NIND}$  раз. Однако вероятность выбора соответствующей особи в этом случае будет пропорциональна рассчитанному по формуле (6) рейтингу, а не абсолютному значению функции приспособленности, как в классическом методе рулетки [14]. Далее с вероятностью  $P_c$  выполняется кроссовер по принципу "дискретной рекомбинации" [13], т. е. обмен соответствующими хромосомами поочередно между двумя расположенными по соседству родительскими особями. Наконец, последним шагом ГА является мутация, проводимая с вероятностью  $P_m$  классическим для хромосом в виде наборов вещественных чисел способом [12, 13], с дальнейшим случайным перемешиванием особей в новом поколении.

Наконец, для каждого нового сформированного поколения проверяется условие окончания процесса оптимизации. Данное условие считается выполненным в двух случаях: если хотя бы у одной из особей текущего поколения функция приспособленности (4) оказывается лучше, чем заданная точность оптимизации ( $\epsilon$ ), т. е. происходит так называемое схождение (convergence) популяции ГА [12, 13]; или если оказывается, что достигнуто максимальное число поколений на данном шаге оптимизации (MAXGEN). При таком подходе в принципе ис-

ключается закливание процедуры оптимизации, и обязательно происходит выход из ГА.

8. Выбор наилучшей особи из текущей или резервной элитной популяции и вывод полученного результата.

На этом шаге из текущей или резервной элитной популяции выбирается особь с наилучшей функцией приспособленности, которая и принимается за результат решения задачи на текущем шаге измерений алгоритма реального времени.

Таким образом, данный алгоритм в реальном времени на каждом шаге измерений способен обеспечить некоторый приемлемый результат, который, чаще всего, будет удовлетворять заранее заданному требованию по точности ( $\epsilon$ ), и лишь в относительно редких случаях, когда и в резервной элитной популяции, и во всех (MAXGEN) поколениях классического ГА не получится найти подходящую особь, это требование будет нарушаться. Кроме того, из схемы алгоритма (рис. 2) следует, что в тех случаях, когда удастся найти приемлемое решение в резервной элитной популяции, процедура классического ГА не выполняется, а это приводит к освобождению значительной части промежутка времени между соседними измерениями для выполнения других параллельных задач реального времени.

### Имитационное моделирование процесса идентификации

В качестве примера применения предлагаемого алгоритма рассмотрим задачу параметрической идентификации колебательного звена второго порядка:

$$W(s) = \frac{K}{T^2 s^2 + 2T\xi s + 1}, \quad (7)$$

где  $K$  — коэффициент усиления объекта;  $T$  — постоянная времени;  $\xi$  — коэффициент демпфирования;  $s$  — переменная Лапласа.

В ходе моделирования были заданы следующие фактические значения параметров объекта:  $K = 0,9$ ;  $T = 0,02$  с;  $\xi = 0,1$ . Время выборки при дискретизации составляло  $T_0 = 0,001$  с. Входной сигнал брали как известное гармоническое воздействие:  $x(k) = \sin(2\pi n f)$  с частотой  $f = 5$  Гц, где  $n = kT_0$ . Шум в измерениях (3) моделировали с помощью случайной белой гауссовской последовательности с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, равной 0,1.

Кроме того, были заданы следующие основные параметры быстрого ГА:  $\text{NIND} = 20$ ;  $\text{MAXELIT} = 20$ ;  $\text{MAXGEN} = 100$ ;  $\epsilon = 10^{-5}$ ;  $P_c = 0,9$ ;  $P_m = 0,04$ , а также диапазоны  $[0; 1]$  варьирования всех идентифицируемых параметров в соответствии с правилом (5).

На рис. 3 представлены результаты идентификации предлагаемым быстрым ГА параметров  $K$ ,  $T$  и  $\xi$  линейного динамического объекта (7), полученные с использованием средств математического пакета MATLAB.

Нетрудно видеть, что оценки параметров сходятся к значениям, близким к истинным, достаточно быстро по сравнению с классическими алгоритмами, практически после обработки измерений, проведенных примерно в течение 0,01 с (что состав-

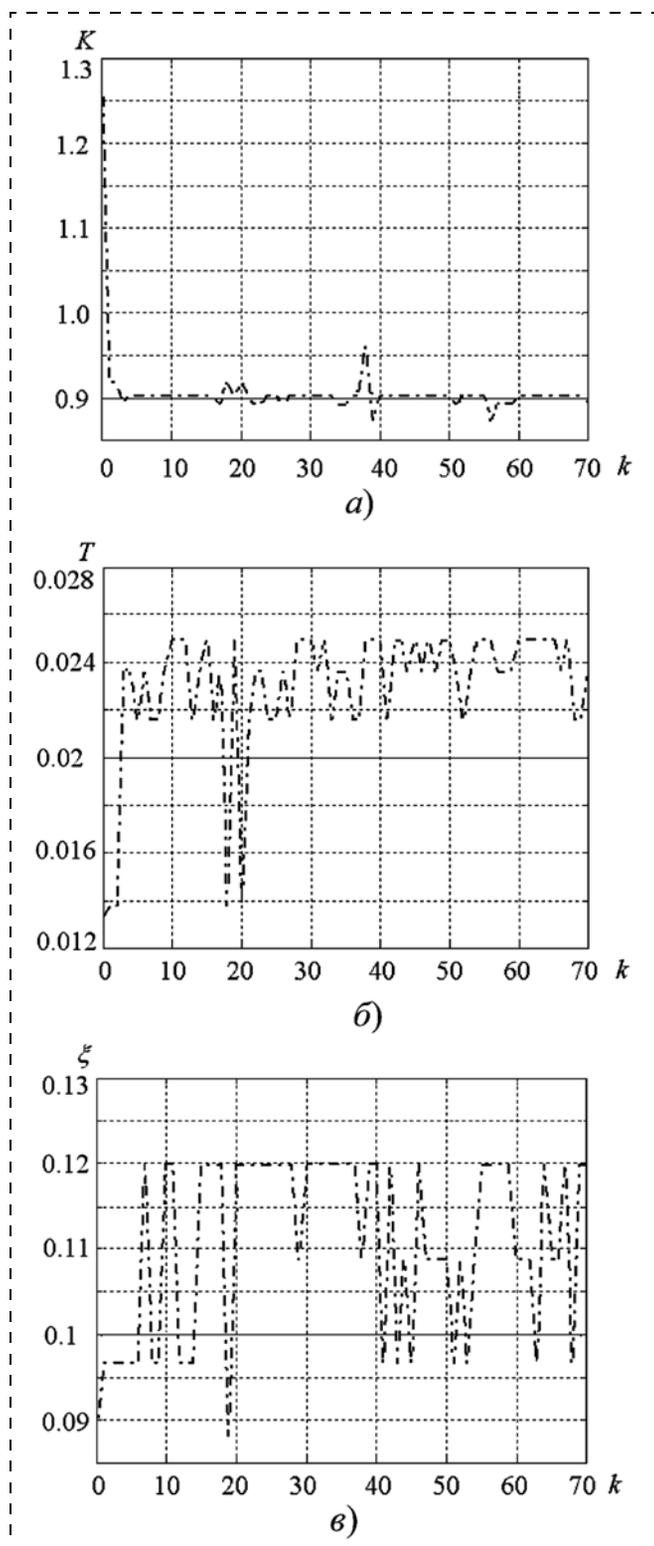


Рис. 3. Результаты идентификации параметров: а — оценки параметра  $K$ ; б — оценки параметра  $T$ ; в — оценки параметра  $\xi$

ляет менее 10 дискретных измерений). Это важное достоинство таких алгоритмов особенно при их использовании в адаптивных системах.

Что касается других свойств оценок, то можно отметить небольшое смещение в оценках постоянной времени и коэффициента демпфирования, которое, однако, не превышает 10...15 %.

Отметим также, что имеется очевидная зависимость дисперсии оценок от заданного показателя точности оптимизации в ГА ( $\epsilon$ ): чем меньше будет этот показатель, тем меньше будет конечная дисперсия оценок, но при этом снизится скорость сходимости и возрастет среднее время вычислений на каждом шаге измерений, поскольку будет чаще задействован классический ГА, а также возрастет число необходимых в нем смен поколений. Следовательно, выбор показателя точности оптимизации ГА ( $\epsilon$ ) дает возможность достичь некоторого компромисса между точностью, скоростью и трудоемкостью процесса параметрической идентификации.

Кроме того, следует помнить, что и другие параметры ГА, такие как число хромосом в каждом поколении, максимальное число элитных особей в элитной популяции, максимальное число поколений на каждом шаге оптимизации, вероятности кроссовера и мутации, также могут существенно влиять на процедуру идентификации. Заметим, что такое поведение в процессе параметрической идентификации в целом свойственно ГА [6—9].

На рис. 4 показано сравнение числа поколений, необходимых классическому ГА и предлагаемому быстрому ГА для идентификации параметров объекта (7) в рассмотренном выше примере на каждом шаге измерений.

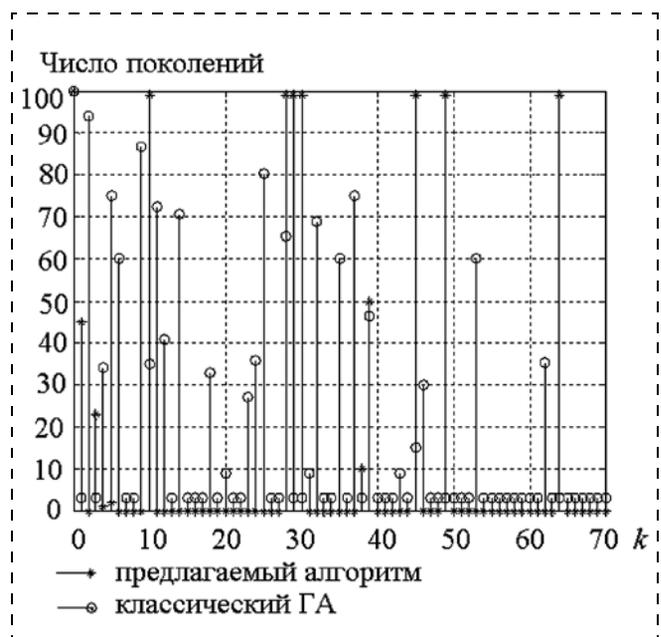


Рис. 4. Число поколений, необходимых классическому ГА и предлагаемому быстрому ГА для идентификации параметров объекта на каждом шаге измерения

Из рис. 4 видно, что быстрому ГА во многих случаях для того, чтобы найти приемлемое решение, достаточно просто извлечь его из резервной элитной популяции, не запуская при этом процедуры эволюционного поиска и не создавая ни одного нового поколения. В среднем на обработку одного измерения за рассмотренный период быстрому ГА понадобилось 13 поколений, а классическому ГА — около 21. Таким образом, параметрическая идентификация с использованием быстрого ГА будет проводиться в среднем примерно в два раза быстрее, чем при использовании классического ГА.

### Заключение

Таким образом, предлагаемый быстрый ГА, как и предполагалось, с одной стороны, при определенных условиях обеспечивает приемлемое качество идентификации неизвестных параметров, как было показано в процессе имитационного моделирования (см. рис. 3). С другой стороны, за счет наличия специальной резервной элитной популяции он позволяет существенно сократить среднее время поиска приемлемого решения при обработке каждого измерения, используя классическую генетическую процедуру оптимизации функции потерь лишь в ситуациях, когда значение этой функции превышает заданный допустимый пороговый уровень.

### Список литературы

1. **Robotics: Science and Systems V.** Edited by Jeff Trinkle, Yoky Matsuoka, and Jose A. Castellanos. The MIT Press: Cambridge, Massachusetts, London, England, 2010. 312 p.

2. **Тимофеев А. В., Экало Ю. В.** Системы цифрового и адаптивного управления роботов. СПб.: Издательство СПбГУ, 2000. 236 с.

3. **Тимофеев А. В.** Методы высококачественного управления, интеллектуализации и функциональной диагностики автоматических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2003. № 5. С. 13—17.

4. **Бурдаков С. Ф.** Идентификация механических характеристик манипуляционных роботов в задачах диагностики // Вибротехника и идентификация механических систем. Иваново: ИЭИ, 1988. С. 93—120.

5. **Льюнг Л.** Идентификация систем. Теория для пользователя. М.: Наука, 1991. 432 с.

6. **Федорова М. А.** Эволюционные методы в системах с обнаружением и адаптацией // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. Электроника, измерительная и радиотехника. 2007. № 1. С. 116—124.

7. **Kristinson K. and Dumont G.** System identification and control using genetic algorithms // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1992. 22 (5). P. 1033—1046.

8. **Tan K. C., Li Y., Murray-Smith D. J. and Sharman K. C.** System identification and linearization using genetic algorithms with simulated annealing // Proc. 1st IEE/IEEE International Conference on Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications. Sheffield, UK, 1995. 6 p.

9. **Tayebbeh Mostajabi, Javad Poshtan.** Control and System Identification via Swarm and Evolutionary Algorithms // International Journal of Scientific & Engineering Research. 2011. V. 2, Iss. 10. P. 1—6.

10. **Michalewicz Z.** Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York, 1996. 387 p.

11. **Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И. Д. Рудинского. М.: Горячая линия — Телеком, 2006. 452 с.

12. **Haupt R. L., Haupt S. E.** Practical Genetic Algorithms. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004. 253 p.

13. **Панченко Т. В.** Генетические алгоритмы: учебно-методическое пособие / Под ред. Ю. Ю. Тарасевича. Астрахань: ИД "Астраханский университет", 2007. 87 с.

14. **Razali N. M., Geraghty J.** Genetic Algorithm Performance with Different Selection Strategies in Solving TSP // Process of the World Congress on Engineering, V. II, London, UK, 2011. 6 p.

**Al-Sabool Ali Hussen Hasan**, Phd, Student at Tula State University, Tula, Russia, Lecturer at Sumer University, Dhiqar, Al-Rifai, Iraq, ali\_hussen\_hassan@yahoo.com,  
**A. N. Grachev**, Associate professor, ga150161@mail.ru, Tula State University

## Parameter Identification of Linear Dynamic Systems by Fast Genetic Algorithm

*A fast genetic algorithm using special reserve elite population for parameter identification of linear dynamic systems is presented. System identification problem can be treated as an optimization problem, where the goal is to find set of parameters that minimize the prediction error between the measured system output and model output at each measure time-step. The classical identification methods, such as least-square method, are calculus-based search method. They have many drawbacks, for example, required a good initial value of the parameters, knowing of the gradient (higher-order derivatives) of the objective function, and possibility to fall into a local minimum. Genetic algorithms (GA) are a family of general stochastic search methods, which can be viewed as computational models of Darwinian evolution theory. However; classical GA are effective methods in the off-line optimization of system identification problems, but they are not too demanding, as could be natural to expect, in terms of their needs of computational power, for real time identifications. In this article we present some modification on the classical GA, which made it applicable in the real time optimization. The basic principle of this genetic algorithm is by creating an array called reserve elite population. This population contains the best fitted chromosomes from the previous optimization cycles, as described through the article. The simulation results are showed that proposed fast genetic algorithm result accepted solutions times. This algorithm may be used in real time systems identification applications.*

**Keywords:** genetic algorithms, reserve elite population, linear dynamic system, parameter identification, real value coding, linear rank selection

## References

1. **Robotics: Science and Systems V.** Edited by Jeff Trinkle, Yoky Matsuoka, and Jose A. Castellanos. The MIT Press: Cambridge, Massachusetts, London, England, 2010. 312 p.
2. **Timofeev A. V., Ekalo Yu. V.** Sistemy tsifrovogo i adaptivnogo upravleniya robotov. SPb.: Izdatel'stvo SPbGU, 2000. 236 p.
3. **Timofeev A. V.** Metody vysokokachestvennogo upravleniya, intellektualizatsii i funktsional'noy diagnostiki avtomaticheskikh sistem. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2003. N. 5. P. 13–17.
4. **Burdakov S. F.** Identifikatsiya mekhanicheskikh kharakteristik manipulyatsionnykh robotov v zadachakh diagnostiki. *Vibrotehnika i identifikatsiya mekhanicheskikh sistem*. Ivanovo: IEI, 1988. P. 93–120.
5. **L'jung L.** Identifikatsiya sistem. Teoriya dlya pol'zovatelya. M.: Nauka, 1991. 432 p.
6. **Fedorova M. A.** Evolyutsionnye metody v sistemakh s obnaruzheniem i adaptatsiyey. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki. Elektronika, izmeritel'naya i radiotekhnika*. 2007. N. 1. P. 116–124.
7. **Kristinson K. and Dumont G.** System identification and control using genetic algorithms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1992. 22 (5). P. 1033–1046.
8. **Tan K. C., Li Y., Murray-Smith D. J. and Sharman K. C.** System identification and linearization using genetic algorithms with simulated annealing. *Proc. 1st IEE/IEEE International Conference on Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications*. Sheffield, UK, 1995. 6 p.
9. **Tayebeh Mostajabi, Javad Poshtan.** Control and System Identification via Swarm and Evolutionary Algorithms. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2011. V. 2, Iss. 10. P. 1–6.
10. **Michalewicz Z.** Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York, 1996. 387 p.
11. **Rutkovskaya D., Pilin'skiy M., Rutkovskiy L.** Neyronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy: Per. s pol'sk. I. D. Rudinskogo. M.: Goryachaya liniya — Telekom, 2006. 452 p.
12. **Haupt R. L., Haupt S. E.** Practical Genetic Algorithms. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004. 253 p.
13. **Panchenko T. V.** Geneticheskie algoritmy: uchebno-metodicheskoe posobie. Pod red. Yu. Yu. Tarasevicha. Astrakhan': ID "Astrakhanskiy universitet", 2007. 87 p.
14. **Razali N. M., Geraghty J.** Genetic Algorithm Performance with Different Selection Strategies in Solving TSP. *Process of the World Congress on Engineering*. V. II, London, UK, 2011. 6 p.



## XIV Всероссийская научно-техническая конференция

### "СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ" (МСОИ—2015)

Оргкомитет XIV Всероссийской научно-технической конференции "Современные методы и средства океанологических исследований" (МСОИ—2015) планирует провести конференцию МСОИ—2015 19–21 мая 2015 г. в г. Москве в Институте океанологии им. П. П. Ширшова по адресу: Москва, Нахимовский проспект, д. 36.

Принимаются доклады и сообщения по следующим направлениям:

1. *Методы гидрофизических исследований океана, измерительные приборы и комплексы.*
2. *Приборы и технологии ресурсных геолого-геофизических исследований в океане.*
3. *Подводные аппараты и роботы, элементная база технических средств.*
4. *Информационные технологии в океанологических исследованиях.*
5. *Методы и средства морских экологических исследований.*

Конференция организуется под руководством и при участии Института океанологии им. П. П. Ширшова, Федерального агентства научных организаций, Российской Академии наук, Российского фонда фундаментальных исследований, НИИСМ МГТУ им. Н. Э. Баумана и ОКБ океанологической техники.

Планируются пленарные, секционные и стендовые доклады по тематическим направлениям работы Конференции, а также выставка образцов новой океанологической техники и инновационных технологий.

Доклады для рассмотрения Оргкомитетом и размещения в материалах Конференции принимаются до 15 января 2015 г.

Тексты докладов подаются в электронном виде по адресу [msoi2015@ocean.ru](mailto:msoi2015@ocean.ru) или на сайт конференции [www.msoi.ocean.ru](http://www.msoi.ocean.ru) на русском языке в объеме до 4 стр. формата А, включая рисунки. Присланный материал дополняется экспертным заключением (при необходимости) и регистрационной формой (с аннотациями на русском и английском языках объемом не более 200 символов). Правила оформления текстов докладов прилагаются к Информационному письму. Доклады, оформленные не в соответствии с правилами, не принимаются. Экспертное заключение подается по факсу или в отсканированном виде в форматах PDF, JPEG по указанному адресу электронной почты или на сайт Конференции. Отобранные Оргкомитетом материалы будут опубликованы в сборнике трудов до начала Конференции. Также на сайте Конференции доступна on-line регистрация участников.

Справки по тел. +7 925 565-67-13, 8 (499) 124-59-87, 8 (499) 124-S5-09,  
E-mail: [msoi2015@ocean.ru](mailto:msoi2015@ocean.ru); [www.msoi.ocean.ru](http://www.msoi.ocean.ru)

УДК 62-40

**В. Н. Евдокименков**, д-р техн. наук, проф., evn@netland.ru,  
**М. Н. Красильщиков**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, mnkr@mail.ru,  
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
**Г. Г. Себряков**, чл.-корр. РАН, нач. отделения, sebr@gosniias.ru,  
ФГУП Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем

## Контроль и интеллектуальная поддержка действий летчика при выполнении типовых полетных режимов на основе индивидуально-адаптированного подхода

*Обсуждается проблема согласования характеристик технического сегмента эргатической системы "самолет—летчик" и операторских возможностей пилота. В качестве одного из возможных путей обеспечения подобного согласования предлагается способ контроля и поддержки действий летчика при выполнении им типовых полетных режимов на основе индивидуально-адаптированного подхода. В основе предлагаемого подхода — интегральная оценка управляющих действий летчика, которая реализуется путем использования интеллектуального ядра системы контроля и поддержки действий летчика в виде так называемого "Электронного паспорта летчика", обеспечивающего согласование индивидуальных управляющих действий летчика и динамических характеристик самолета.*

*Приведены примеры, иллюстрирующие эффективность развиваемой концепции индивидуально-адаптированной поддержки действий летчиков.*

**Ключевые слова:** эргатическая система "самолет—летчик", индивидуально-адаптированный подход, доверительный эллипсоид, индивидуальный профиль летчика, электронный паспорт летчика

### Введение

Анализ современных тенденций развития авиационной техники (как гражданского, так и военного назначения) подтверждает все более активное использование бортовых экспертных систем, построенных на принципах искусственного интеллекта. Их общее назначение — контроль деятельности летчика, а также, в случае необходимости, формирование и выдача рекомендаций, облегчающих выработку летчиком решений в процессе пилотирования, особенно в особых ситуациях полета. Работы в данной предметной области активно ведутся как за рубежом (системы "Falcon View", "Intelligent Flight Control System", "Predictive Failures & Advanced Diagnostics"), так и в нашей стране (ФГУП ГосНИИАС, корпорация "Русские Системы", корпорация "Иркут" и др.).

Вместе с тем, существующие отечественные и зарубежные прототипы подобных систем не реализуют в полной мере функции контроля и поддержки действий летчика на основе согласованного учета текущего состояния самолета и индивидуальных психофизиологических реакций летчика. В отличие от известных решений подход, развиваемый в статье, характеризуется тем, что анализ текущей ситуации в системе "самолет—летчик" и прогноз ее развития максимально адаптированы к особенностям эксплуатации конкретного самолета и к индивидуальным психофизиологическим реакциям

летчика путем введения в соответствующую систему такого функционального элемента, как "Электронный паспорт летчика". Именно этот элемент, как будет показано ниже, представляющий наращиваемую в процессе деятельности летчика базу данных, обеспечивает возможность индивидуально-адаптированного контроля и поддержки действий летчика.

### 1. Актуальность проблемы согласования характеристик технического сегмента эргатической системы "самолет—летчик" и операторских возможностей пилота

С развитием авиационной техники становится значительно более сложной деятельность экипажа при управлении самолетом и его бортовыми системами. В частности, решение задач, стоящих перед экипажем современного самолета при проведении боевой операции, требует от него мобилизации всех психофизиологических ресурсов, т. е. работы на пределе возможностей. Нередко возникает ситуация, когда ограниченность психофизиологических возможностей пилота не позволяет в полной мере реализовать технический потенциал самолета. Подобная ситуация наблюдается, например, когда летчик участвует в наиболее сложной и ответственной фазе боевой операции: наведении на цель управляемого авиационного оружия.

Таким образом, по мере усложнения деятельности экипажа фактором, определяющим в конечном

итоге эффективность функционирования системы "самолет—летчик", становится уровень согласованности возможностей биологического (экипаж) и технического (самолет) сегментов. Это, в первую очередь, приводит к необходимости всестороннего и полного учета человеческого фактора на всех стадиях проектирования авиационной системы в целях согласования возможностей технических устройств и характеристик психических процессов, функций и состояний пилота.

Актуальность указанной проблемы подчеркивается результатами исследований, свидетельствующими о том, что из-за недостаточно полного учета возможностей летчика в процессе проектирования пилотируемых авиационных систем фактический уровень эффективности авиационного вооружения в ряде случаев снижается на 25...30 %, сроки освоения авиационной техники увеличиваются в 3...5 раз, растут временные и материальные затраты на ее разработку и эксплуатацию.

Таким образом, уже на стадии проектирования самолета необходим учет особенностей взаимодействия человека с бортовым оборудованием и характеристик деятельности летчика в различных типовых режимах, возникающих в процессе полета. Решение задачи обеспечения оптимального взаимодействия летчика с техническим сегментом системы "самолет—летчик" требует осуществления целого комплекса мер. Мы не будем касаться путей повышения эффективности авиационных систем за счет расширения их технических возможностей и условий применения, за счет разработки и использования новых средств, обеспечивающих совершенствование способов отображения пилотажной информации и расширения ее состава. Основное внимание сосредоточим на анализе возможностей и путях повышения эффективности системы "самолет—летчик" за счет согласования управляющих реакций пилота с техническим сегментом системы на уровне их динамического взаимодействия.

Традиционными методами, используемыми для согласования возможностей летчика и динамических характеристик самолета, являются полунатурное моделирование и натурный эксперимент. Однако их использование сопряжено с существенными затратами, ограничивающими реальные возможности полунатурного и натурального экспериментов, особенно на ранних этапах разработки, когда проводится сравнительный анализ различных вариантов реализации компонентов системы "самолет—летчик".

Это обстоятельство указывает на необходимость развития подходов, базирующихся на методах математического моделирования, что требует решения следующих задач:

1) исследование особенностей поведения летчика как элемента эргатической системы "самолет—летчик";

2) разработка методов формального описания процессов функционирования системы "самолет—летчик";

3) разработка критериев и методов ее оптимизации.

Разработка математических моделей, описывающих деятельность пилота как элемента эргатической системы "самолет—летчик", является наиболее важной и сложной из перечисленных выше задач [1]. Именно отсутствие хороших, адаптированных для целей проектирования моделей функционирования системы "самолет—летчик" затрудняет использование для решения обсуждаемой задачи известных методов теории автоматического управления и обуславливает ту определяющую роль, которую сохраняют экспериментальные методы исследований.

Не менее важной является проблема формирования критериев оптимальности эргатической системы "самолет—летчик". С одной стороны, как уже подчеркивалось ранее, в процессе разработки нельзя исходить лишь из технических требований к динамическим характеристикам системы управления, поскольку показатели качества контура управления замкнутой системой "самолет—летчик" в значительной мере зависят от эргономического обеспечения процесса управления, т. е. от того, в какой мере летчик способен оперативно воспринимать и анализировать информационные сигналы, отображаемые на приборной панели. При этом необходимо учитывать, что в человеко-машинных системах одинаковые показатели качества процессов управления могут достигаться при различной напряженности работы оператора. Поэтому отсутствие согласованности характеристик технического сегмента человеко-машинной системы с возможностями оператора, которое в других условиях можно компенсировать его более напряженной работой, применительно к эргатической системе "самолет—летчик" становится неприемлемым. С другой стороны, проектируя систему "самолет—летчик", невозможно ограничиться лишь эргономическими требованиями, поскольку действия летчика следует рассматривать с учетом целевых задач вылета, обеспечение которых требует учета эксплуатационных характеристик самолета [2].

Важно подчеркнуть, что использование математических методов исследования эргатической системы "самолет—летчик" не ставит своей целью полное исключение полунатурного моделирования и летного эксперимента. Эти методы должны использоваться совместно, дополняя друг друга. По нашему мнению, такой подход к согласованию управляющих реакций летчика и динамических возможностей самолета, комбинирующий данные о состоянии системы "самолет—летчик", которые накапливаются в процессе реальных полетов, и математические модели, описывающие деятельность летчика, реализован в рамках обсуждаемой ниже концепции индивидуально-адаптированного контроля и поддержки действий летчика, впервые сформулированной авторами в работах [3—5].

## 2. Контроль и поддержка действий летчика на основе индивидуально-адаптированного подхода

В работе авторов [5] предложена концепция бортовой информационно-экспертной системы, в рамках которой анализ текущей ситуации в системе "самолет—летчик" и прогноз ее развития максимально адаптирован к особенностям всей предшествующей эксплуатации конкретного самолета с учетом его текущего ресурса и индивидуальным управляющим реакциям летчика за счет реализации интеллектуального ядра системы в составе функциональных блоков, именуемых соответственно "Электронный паспорт самолета" (ЭПС) и "Электронный паспорт летчика" (ЭПЛ). В данной статье основное внимание будет уделено способу формирования ЭПЛ, наличие которого позволяет в максимальной степени согласовать индивидуальные управляющие реакции конкретного летчика и динамические характеристики самолета в процессе выполнения типовых полетных режимов.

Исследования в области авиационной медицины и психологии показывают, что в процессе формирования навыка пилотирования самолета у летчика складывается индивидуальный динамический двигательный стереотип, который внешне характеризуется дозированными, целенаправленными перемещениями рычагов управления (ручки управления самолетом (РУС), ручки управления двигателем (РУД), педалей). При этом вырабатываются оптимальная амплитуда, частота и скорость их перемещения. В конечном итоге закрепляется наиболее совершенная их форма, адекватная аэродинамике самолета и психофизиологическим особенностям конкретного летчика, которая определяет его индивидуальную манеру пилотирования ("почерк").

Этот вывод подтверждается результатами полунатурного моделирования траекторий посадки са-

молета Су-27 на сертифицированном пилотажном стенде с привлечением штатных военных летчиков. Каждым из летчиков было выполнено 20 посадочных режимов, реализованных в идентичных условиях, в процессе которых обеспечивалось приведение самолета на взлетно-посадочную полосу (ВПП). В результате проведенного стендового моделирования были накоплены значения параметров, характеризующих движение центра масс самолета, его угловое положение и управляющие реакции летчика, выраженные перемещением рычагов управления (РУС, РУД).

На основе накопленных данных была проведена оценка достоверности дифференциации конкретных летчиков на основе комбинации параметров движения самолета и управляющих реакций летчика. Для этого традиционным методом дискриминантного анализа решалась задача классификации, в которой в качестве объекта распознавания выступал конкретный летчик, а в качестве признаков распознавания — вектор, содержащий параметры траектории движения самолета и управляющие реакции летчика. Вероятность правильного распознавания каждого из трех летчиков экспериментальной группы по комбинации параметров движения самолета и параметров, характеризующих управляющие реакции летчика, составила 0,9118 (рис. 1).

Заметим, что в эксперименте участвовали летчики примерно одинаковой квалификации, выполнявшие достаточно жесткий режим (посадка на ВПП), управление на котором строго регламентировано руководством по летной эксплуатации. Даже в этих максимально регламентированных условиях проявляется индивидуальная манера управления, свойственная отдельным летчикам, которая с высокой степенью достоверности проявляется в пространстве параметров, характеризующих движение самолета и управляющие реакции летчика.

Этот результат позволяет сделать следующие выводы, имеющие принципиальное значение с точки зрения формирования структуры ЭПЛ:

- индивидуальные особенности управляющих действий летчика статистически достоверно подтверждаются различиями в значениях параметров движения самолета и параметров, характеризующих управляющие реакции летчиков, на данном типовом режиме;
- этот факт позволяет сформировать в пространстве "параметры движения — управляющие реакции пилота" так называемые доверительные области (множества достижимости), в пределах которых с заданной вероятностью га-



Рис. 1. Достоверность идентификации летчиков на основе значений траекторных параметров

рантируется успешное выполнение целевой задачи;

- использование этих (постоянно обновляемых для конкретного летчика и конкретного типового режима) доверительных областей в структуре ЭПЛ делает принципиально возможным индивидуально-адаптированный контроль текущих управляющих действий летчика и выработку необходимых рекомендаций по предотвращению особых ситуаций, максимально учитывающих динамические характеристики самолета.

Следующая проблема заключается в разработке способа построения множества достижимости и его компактного представления в структуре ЭПЛ. Заметим, что точное построение множеств достижимости, особенно для нелинейных систем большой размерности, представляет собой весьма сложную задачу, решение которой сопряжено с теоретическими и вычислительными проблемами. Поэтому речь может идти о приближенном построении множеств достижимости на основе их приемлемой аппроксимации. При выборе варианта аппроксимации множества достижимости необходимо учитывать, что функционирование системы "самолет—летчик" осложняется присутствием неконтролируемых факторов случайной природы. В подобной ситуации определение множества достижимости, характеризующего возможность успешного решения целевой задачи конкретного типового режима, возможно лишь в вероятностном смысле. Принимая во внимание это соображение, а также наличие корреляции между параметрами состояния системы "самолет—летчик", целесообразно в качестве математической модели множества достижимости рассмотреть индивидуальный доверительный эллипсоид заданной вероятностной меры, формируемый в пространстве параметров, характеризующих состояние самолета и управляющие реакции летчика.

Одним из конструктивных способов приближенного построения индивидуального доверительного эллипсоида, соответствующего конкретному типовому режиму полета, является статистическая обработка некоторого объема данных для траекторий движения, выполненных конкретным летчиком. Такие данные доступны и могут быть накоплены в процессе отработки летчиком выбранного типового режима, выполняемого для различного набора начальных позиций и реализаций возмущений (помех), как в условиях полунатурного (стендового) моделирования, так и в условиях реальных полетов. Более того, эта статистическая информация наращивается от полета к полету, что предполагает непрерывное уточнение индивидуальной области достижимости.

Рассмотрим алгоритм построения множества достижимости в классе доверительных эллипсоидов. Введем следующие обозначения:  $\mathbf{Z}^T = (z_1, \dots, z_n)$  — вектор состояния системы "самолет—летчик", компонентами которого, как уже указывалось ранее, являются параметры состояния самолета и параметры, характеризующие управляющие действия

летчика. Будем исходить из того, что для анализа доступен некоторый объем  $N$  стендовых и натурных испытаний, в процессе которых для различных реализаций начальных параметров состояния системы "самолет—летчик"  $\mathbf{Z}^k(0)$ ,  $k = 1, \dots, N$ , летчиком выполнялся выбранный типовой режим и оценивалось качество его выполнения.

Предположим, что целью выполнения типового полетного режима является приведение самолета в заданную область  $M$ , представляющую собой параллелепипед в пространстве контролируемых параметров  $z_i(T)$ ,  $i = 1, \dots, n$ , состояния системы "самолет—летчик", характеризующий их допустимый разброс:  $M = \{\mathbf{Z}(T): z_{i\min} \leq z_i(T) \leq z_{i\max}\}$ . В этом случае для оценки качества выполнения типового режима удобно использовать величину

$$\mu = \left| \frac{z_i - \frac{1}{2}(z_{i\max} + z_{i\min})}{\frac{1}{2}(z_{i\max} + z_{i\min})} \right|. \quad (1)$$

Очевидно, что таким образом определенная индикаторная функция  $\mu$  в пределах заданных ограничений принимает значения в диапазоне  $0 \leq \mu \leq 1$ , причем значение  $\mu = 0$  соответствует приведению самолета в центр параллелепипеда терминальных ограничений, т. е. указывает на "идеальное" выполнение типового полетного режима, и напротив, значения  $\mu > 1$  указывают на нарушение терминальных ограничений, т. е. являются признаком неудовлетворительного выполнения полетного режима.

Таким образом, в результате выполнения программы стендовых испытаний для любого момента  $t$  выполнения типового режима ( $0 \leq t \leq T$ ) накоплены реализации  $\mathbf{Z}^k(t)$ ,  $k = 1, \dots, N$ , параметров состояния системы "самолет—летчик" и реализации  $\mu_k$ ,  $k = 1, \dots, N$ , значений индикаторной функции для каждой из траекторий типового полетного режима. По известным реализациям  $\mathbf{Z}^k(t)$ ,  $k = 1, \dots, N$ , для некоторого фиксированного момента выполнения полетного режима  $t$  рассчитывается математическое ожидание  $\mathbf{m}_Z(t) = M[\mathbf{Z}(t)] = [m_{z_1}(t), \dots, m_{z_n}(t)]^T$  и ковариационная матрица  $\mathbf{K}_Z(t) = M[(\mathbf{Z}(t) - \mathbf{m}_Z(t)) \times (\mathbf{Z}(t) - \mathbf{m}_Z(t))^T]$  вектора состояния системы "самолет—летчик"  $\mathbf{Z}(t)$ . В качестве оценок математического ожидания и корреляционной матрицы используются их выборочные оценки. Оценивается характерный размер  $R_{\max}$  предельного доверительного эллипсоида  $E^\beta(t)$ , которому с гарантированной вероятностью  $\beta$ , близкой к единице, принадлежат реализации вектора состояния системы "самолет—летчик":

$$E^\beta(t) = \{ \mathbf{Z}(t): (\mathbf{Z}(t) - \mathbf{m}_Z(t))^T \mathbf{K}_Z^{-1}(t) (\mathbf{Z}(t) - \mathbf{m}_Z(t)) \leq R_{\max}^2 \}. \quad (2)$$

Алгоритм, позволяющий рассчитать характерный размер  $R_{\max}$  доверительного эллипсоида, подробно описан в работе [5].

Напомним, что каждой реализации  $\mathbf{Z}^k(t)$ ,  $k = 1, \dots, N$ , вектора состояния соответствует значение индикаторной функции  $\mu(R_k)$ ,  $k = 1, \dots, N$ , где  $R_k = [(\mathbf{Z}^k(t) - \mathbf{m}_Z(t))^T \mathbf{K}_Z^{-1}(t)(\mathbf{Z}^k(t) - \mathbf{m}_Z(t))]^{1/2}$ , характеризующей качество выполнения целевой задачи рассматриваемого типового полетного режима в соответствии с (1). Рассматривая значения  $\mu(R_k)$ ,  $k = 1, \dots, N$ , как "измерения" неизвестной истинной функции  $\mu(R)$ , можно рассчитать ее оценки, например, с использованием алгоритма полиномиальной аппроксимации [5]. Эта зависимость делает возможным для любой текущей реализации вектора состояния системы "самолет—летчик" оперативно получить индивидуальную оценку качества выполнения конкретным летчиком целевой задачи типового полетного режима.

Описанная выше процедура с некоторым шагом  $\delta t$  повторяется для каждого момента  $t$  выполнения типового полетного режима. В результате для последующего представления в ЭПЛ формируется (и непрерывно уточняется в процессе деятельности) так называемый индивидуальный профиль летчика (ИПЛ) в виде зависимости  $\mu(R, t)$ , характеризующей для любого момента выполнения типового полетного режима  $t$  качество выполнения целевой задачи в зависимости от текущего состояния  $\mathbf{Z}(t)$  системы "самолет—летчик" с учетом опыта, квалификации и специфики индивидуальных управляющих реакций, присущих конкретному летчику (рис. 2).

Подчеркнем те преимущества, которые возникают в результате включения в ЭПЛ параметров индивидуального доверительного эллипсоида летчика в виде его индивидуального профиля.

1. Возможность локализации момента возникновения опасности, препятствующей успешному решению целевой задачи. Существенно то, что для

одной той же комбинации параметров движения самолета степень этой опасности может быть разной для разных летчиков. Это определяется их опытом и квалификацией, отраженной в ИПЛ.

2. Наличие в ЭПЛ индивидуального профиля, отражающего свойственную летчику манеру выполнения режима посадки, позволяет достаточно просто, сохраняя традиционную компоновку пилотажно-навигационного прибора, а значит, привычный для летчика приборный образ, реализовать идею его индивидуально-адаптированной поддержки. Это может быть достигнуто за счет использования в качестве базы для формирования текущего положения курсовой и глиссадной директорных планок не заданную траекторию, формируемую радиотехнической системой посадки, а центр индивидуально-доверительного эллипсоида.

3. На основе использования в ЭПЛ доверительного эллипсоида летчика можно не только локализовать момент, когда возникает опасность, препятствующая успешному решению целевой задачи, но и выявить источник возникновения особой ситуации в полете. Дело в том, что возникновение особой ситуации может быть обусловлено разными причинами, а именно:

- нештатными режимами функционирования бортовых систем самолета;
- неучетом (игнорированием) летчиком в процессе управления информационных сигналов, отображаемых на бортовых индикаторах;
- недостаточной координацией перемещения летчиком органов управления (РУС, РУД, педали).

Каждая из этих причин оказывает влияние на вектор состояния системы "самолет—летчик" и может стать источником возникновения особой ситуации. Поэтому важно не только выявить момент возникновения

опасности развития особой ситуации, но и конкретизировать ее причину. Идея одного из возможных способов решения этой задачи опирается на описание индивидуального множества достижимости летчика в классе доверительных эллипсоидов. Представим вектор состояния системы "самолет—летчик"  $\mathbf{Z}$  в виде блочного вектора, компонентами которого являются параметры состояния самолета  $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  и параметры управления (перемещения органов управления)  $\mathbf{U} = [u_1, u_2, \dots, u_m]^T$ :  $\mathbf{Z}^T = [\mathbf{X}^T \mathbf{U}^T]$ . С учетом блочного представления вектора  $\mathbf{Z}$  приведенное выше уравнение индивидуального доверительного эллипсоида  $E^\beta$  может быть представлено в виде суммы трех составляющих, которые обозначим  $R_{XX}^2$ ,  $R_{UX}^2$ ,  $R_{UU}^2$ , т. е.

$$R_{XX}^2 + 2R_{UX}^2 + R_{UU}^2 \leq R_{\max}^2,$$

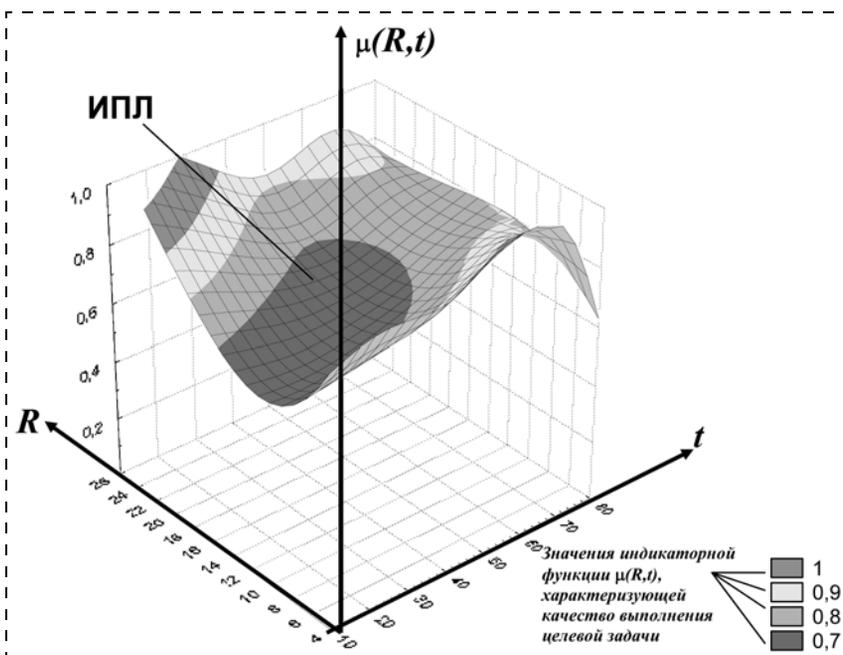


Рис. 2. Индивидуальный профиль летчика

где  $R_{XX}$  — размер эллипсоида  $E_{XX} = \{X: (X - m_X)^T \times P_{XX}^{-1} (X - m_X) \leq R_{XX}^2\}$ , отражающего статистическую связь между параметрами состояния самолета в некоторый фиксированный момент реализации типового режима. Выход текущей реализации вектора состояния самолета  $X$  за границы эллипсоида  $E_{XX}$  указывает на то, что текущие динамические характеристики самолета не соответствуют заданным;

$R_{UX}$  — размер эллипсоида  $E_{UX} = \{U \times X : (U - m_U)^T P_{UX}^{-1} (X - m_X) \leq R_{UX}^2\}$ , устанавливающего статистическую связь между параметрами состояния и управления самолета. Эта связь, главным образом, характеризует то, как летчик преобразует приборный образ полета (т. е. информацию о значениях параметров состояния самолета, поступающих с датчиков) в перемещения органов управления (педаль, РУС, РУД). Выход текущих значений параметров состояния самолета и управляющих реакций летчика за границу эллипсоида  $E_{UX}$  может указывать на недостаточную внимательность летчика, неучет им каких-либо информационных сигналов, отражающих значения параметров состояния самолета и влияющих на выработку летчиком управляющих воздействий. Более того, анализ тех конкретных параметров, по которым наблюдается выход за границу доверительного эллипсоида  $E_{UX}$ , позволяет локализовать тот информационный сигнал, который не учитывается или игнорируется летчиком при формировании им управляющих действий;

$R_{UU}$  — размер эллипсоида  $E_{UU} = \{U : (U - m_U)^T P_{UU}^{-1} (U - m_U) \leq R_{UU}^2\}$ , описывающего статистическую связь между различными управляющими реакциями летчика (перемещениями педалей, ручки управления двигателем). Эта связь, главным образом, отражает специфику управляющих действий летчика, то, как он организует комбинированное управление одновременным воздействием на органы управления самолетом. Выход текущих значений параметров управления за границы эллипсоида  $E_{UU}$  может указывать на неадекватность текущих управляющих действий летчика. Те конкретные управляющие параметры, по которым выявлен выход за границу эллипсоида  $E_{UU}$ , позволяют локализовать те органы управления, воздействия на которые не синхронизированы летчиком и осуществляются без обеспечения их необходимой взаимосвязи.

Ковариационные матрицы  $R_{XX}$ ,  $R_{UX}$ ,  $R_{UU}$ , участвующие в описаниях эллипсоидов  $E_{XX}$ ,  $E_{UX}$ ,  $E_{UU}$ , рассчитываются на основе ковариацион-

ных матриц  $K_{XX}$ ,  $K_{UX}$ ,  $K_{UU}$ , устанавливающих статистические связи между компонентами блочного вектора  $Z$  с помощью известных соотношений.

На рис. 3 представлен пример, иллюстрирующий использование индивидуального доверительного эллипсоида  $E^\beta$  для оценки состояния системы "самолет—летчик". В качестве основы использовались полетные данные, накопленные в ходе полунатурного моделирования траекторий посадки самолета Су-27 на сертифицированном пилотажном стенде. Представлены проекции рассчитанного доверительного эллипсоида в четырех координатных плоскостях:

- "угол тангажа — угол крена" (что соответствует проекции доверительного эллипсоида  $E_{XX}$ );
- "угол тангажа — перемещение РУС (канал тангажа)" (что соответствует проекции доверительного эллипсоида  $E_{UX}$ );
- "угол крена — перемещение РУС (канал крена)" (что соответствует проекции доверительного эллипсоида  $E_{UX}$ );
- "перемещение РУС (канал тангажа) — перемещение РУС (канал крена)" (что соответствует проекции доверительного эллипсоида  $E_{UU}$ ).

Предметом анализа стал посадочный режим, выполненный с нарушением требуемых ограничений на параметры движения в точке, соответствующей срезу ВПП. На рис. 3 точками показаны значения соответствующих параметров, измеренные в процессе выполнения посадки. Видим, что в определенный момент летчик осуществил перемещение РУС по тангажу без адекватного учета информации о его текущем значении, отображаемом на приборной панели. Следствием этого явился выход изо-

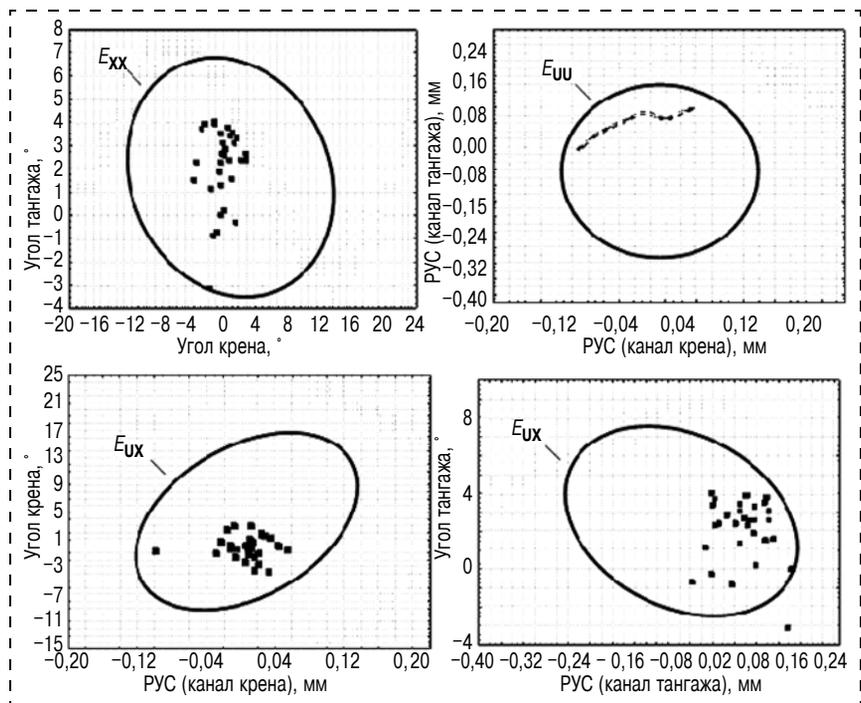


Рис. 3. Пример оценки состояния системы "самолет — летчик" на основе эллипсоидальной модели

бражающей точки за границы проекции доверительного эллипсоида в координатной плоскости "угол тангажа — перемещение РУС (по тангажу)". Иными словами, нештатное приведение самолета на срез ВПП было вызвано тем, что летчик выполнил перемещение РУС, не согласованное с текущим значением угла тангажа.

### Заключение

В работе рассмотрена концепция индивидуально-адаптированного контроля управляющих действий летчика в процессе выполнения типового полетного режима, основанная на формировании множеств достижимости и их параметрическом представлении в электронном паспорте летчика в виде индивидуального профиля. Достоинство такого подхода к организации индивидуально-адаптированного контроля управляющих действий летчика состоит в том, что он опирается на данные штатной системы бортовых измерений самолета и не требует непосредственной регистрации в процессе полета показателей, характеризующих текущие психофизиологические реакции летчика. В рамках

развиваемого в работе подхода их учет проводится косвенно на основе интегральной характеристики, выраженной в виде индивидуального профиля летчика.

### Список литературы

1. Себряков Г. Г., Желтов С. Ю., Огинский А. А. Человеко-машинные системы управления // *Машиностроение. Энциклопедия*. Т. 1—4. Автоматическое управление. Теория. М.: Машиностроение, 2000. С. 604—641.
2. Себряков Г. Г. Проблемы проектирования полуавтоматических систем наведения летательных аппаратов // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2007. № 10. С. 2—8.
3. Базлев Д. А., Евдокименков В. Н., Красильщиков М. Н. Построение характеристических множеств для индивидуально-адаптированной поддержки летчика при выполнении типовых полетных режимов // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2008. № 4. С. 97—108.
4. Евдокименков В. Н., Красильщиков М. Н. Формирование интеллектуального ядра бортовой экспертной системы, адаптированной к индивидуальной манере пилотирования // *Тез. докл. Международная конференция по математической теории управления и механики*. Суздаль 3—7 июня 2009 г.
5. Красильщиков М. Н., Евдокименков В. Н., Базлев Д. А. Индивидуально-адаптированные бортовые системы контроля технического состояния самолета и поддержки управляющих действий летчика. М.: МАИ, 2011.

V. N. Evdokimenkov, Professor, evn@netland.ru,

M. N. Krasilshchikov, Professor, Head of Chair, mnkr@mail.ru,  
Moscow Aviation Institute (National Research University),

G. G. Sebrjakov, Head of Department, sebr@gosnias.ru, State Research Institute of Airborne Systems

## Pilot Actions Individually Adopted Intellectual Both Monitoring and Support Applying to Standard Flight Modes

*The problem of both technical performances and human operator opportunities coordination is considered in the paper applying to ergatic "airplane-pilot" system. The novel approach of above mentioned problem solution is suggested, which is based on so-called individually adopted intellectual human operator actions monitoring and support. This novel approach could be recommended, in particular, for pilot staff training process upgrading, as well as for on-board prospective airplanes expert system implementation.*

*The discussing approach is based on pilot control actions integrated evaluation, which is generated, using indirect data, considering airplane dynamic performances. This approach not required of on-line registration any data, which reflect actual pilot psycho-physiological state.*

*The mentioned above integrated evaluation is implemented due to utilization of so called "Pilot electronic passport" (PEP), which in feat, is intellectual kernel of individually adopted system of both pilot actions monitoring and support. This PEP provides coordination of pilot individual control actions and airplane dynamic performances, applying to standard flight modes.*

*The examples demonstrating suggested approach efficiency are given in paper.*

**Keywords:** ergatic system "airplane-pilot", individually adopted approach, individual pilot profile, pilot electronic passport, confidential ellipsoid

### References

1. Sebrjakov G. G., Zheltov S. Yu., Oginskiy A. A. Cheloveko-mashinnye sistemy upravleniya. *Mashinostroenie. Entsiklopediya*. T. 1—4. *Avtomaticheskoe upravlenie*. Teoriya. M.: Mashinostroenie, 2000. P. 604—641.
2. Sebrjakov G. G. Problemy proektirovaniya poluavtomaticheskikh sistem navedeniya letatel'nykh apparatov. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy*. 2007. N. 10. P. 2—8.
3. Bazlev D. A., Evdokimenkov V. N., Krasil'shchikov M. N. Postroenie kharakteristicheskikh mnozhestv dlya individual'no-adaptirovannoy podderzhki letchika prim vypolnenii tipovykh poletnykh

rezhimov. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*. 2008. N. 4. P. 97—108.

4. Evdokimenkov V. N., Krasil'shchikov M. N. Formirovanie intellektual'nogo yadra bortovoy ekspertnoy sistemy, adaptirovannoy k individual'noy manere pilotirovaniya. *Tez. dokl. Mezhdunarodnaya konferentsiya po matematicheskoy teorii upravleniya i mekhaniki*. Suzdal' 3—7 iyunya 2009 g.

5. Krasil'shchikov M. N., Evdokimenkov V. N., Bazlev D. A. Individual'no-adaptirovannye bortovye sistemy kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya samoleta i podderzhki upravlyayushchikh deystviy letchika. M.: MAI, 2011.

УДК 004.3.06

**С. Л. Беляков**, д-р. техн. наук, проф., beliacov@yandex.ru,

**А. В. Боженюк**, д-р. техн. наук, проф., avb002@yandex.ru,

**И. А. Кожаров**, аспирант, i.kozharov@gmail.com,

Инженерно-технологическая академия Южного федерального университета, г. Таганрог

## Адаптация грузопотока в механических транспортных системах на основе опыта его наблюдения

*Исследуется адаптация грузопотока к возникновению локальных перегрузок в механической транспортной системе. Механизм адаптации построен на основе перенаправления потоков соответственно прогнозу экспертов, наблюдающих поведение грузопотока в сети. Предлагается модифицированный вариант прецедентного анализа, использующий концепцию образного представления ситуаций. В отличие от известных способов образное описание прецедентов повышает достоверность принятия решений. Предлагается модификация алгоритма динамического построения маршрутных таблиц контроллерами транспортной сети. Приведены соотношения для оценки эффективности предлагаемого способа адаптации.*

**Ключевые слова:** адаптация, интеллектуальные транспортные системы, прецедентный анализ, механические транспортные системы, маршрутизация

### Введение

Механические транспортные системы (МТС) представляют собой класс транспортных систем, использующих конвейеры для перемещения груза [1]. Конвейеры образуют сеть, в узлах которой находятся переключатели направления движения. Переключатель представляет собой механическое устройство, которое направляет единицу груза с выхода одного конвейера на один из входов, примыкающих к нему конвейеров. Примером подобных систем являются МТС доставки багажа в аэропортах. Общее число конвейеров и переключателей в рассматриваемых системах может быть достаточно велико, что предполагает несколько вариантов транспортировки каждой единицы груза.

Возникновение перегрузок — одна из серьезных проблем эксплуатации МТС. Падение пропускной способности отдельного конвейера либо подсети конвейеров приводит к затору ("пробке"), провоцирующему аварийную ситуацию. Снижение пропускной способности обусловлено как свойствами транспортирующих механизмов, так и свойствами груза. Сбои и отказы оборудования, недопустимые масса, габаритные размеры и упаковка груза сложным образом влияют на поведение грузопотока, делают затруднительным аналитическое прогнозирование. В связи с этим особый интерес вызывают адаптивные механизмы, позволяющие получить требуемое качество транспортировки при изменении условий функционирования МТС.

Исследования в данном направлении ведутся разными путями. Постановка задачи управления

транспортным потоком как задачи маршрутизации на графах [5] предполагает ряд серьезных упрощений, затрудняющих последующую интерпретацию результата. Более общие постановки [6, 7] дают решения при условии построения адекватных формальных моделей изменения интенсивности транспортных потоков. В реальных приложениях недостаток данных и неопределенность имеющейся информации значительно затрудняют построение достоверных моделей. Аппарат вероятностного подхода [8, 9], имитационного моделирования грузопотока [10] дает специфические возможности описания и анализа труднопредсказуемых событий, однако окончательно проблему не решает.

В данной статье исследуется подход к адаптации, основанный на использовании гибридного интеллекта [2, 3]. Гибридный интеллект в данном случае сочетает знания оператора-эксперта, изучающего и оценивающего поведение МТС, с программно-реализованной процедурой маршрутизации. Адаптация реализуется за счет корректировки стратегии маршрутизации на основе опыта эксперта.

### Методы маршрутизации и проблема адаптации грузопотоков

Задачу управления грузопотоком при наличии риска возникновения заторов можно сформулировать следующим образом:

$$\begin{cases} \sum_i l_i + w_{f_i}(t) \rightarrow \min; \\ t < t^*, \\ f_i \subseteq F, \end{cases} \quad (1)$$

где  $l_i$  — стоимость транспортировки отдельно взятой единицы груза;  $w_{f_i}(t)$  — затраты на устранение последствий перегрузки из-за дефекта  $f_i \in F$ ;  $F$  — множество возможных дефектов, приводящих к перегрузкам;  $t^*$  — граница временного интервала транспортировки. Приведенные соотношения отражают главные особенности задачи, определяющие пути поиска ее решения:

- темпоральный характер зависимости затрат на транспортировку;
- наличие временной границы для функции затрат;
- необходимость иметь информацию о возможных дефектах на временном интервале транспортировки.

Маршрутизация является одним из механизмов защиты транспортной сети от перегрузок. Перенаправление грузопотока из перегруженных подсетей в менее загруженные является очевидным способом избежать заторов груза. Возможность адаптироваться к перегрузкам за счет маршрутизации имеется в сетях, обладающих резервом пропускной способности. Чтобы реализовать эту возможность, процедура определения маршрута транспортировки должна учитывать состояние среды транспортировки.

Методы маршрутизации, применяемые в транспортных сетях, можно разделить на методы *фиксированной и динамической маршрутизации* [1, 4]. Фиксированная маршрутизация использует неизменяющиеся таблицы маршрутов. Эти таблицы загружаются централизованно в память контроллеров МТС. Динамическая маршрутизация предполагает, что контроллеры самостоятельно настраивают таблицы маршрутов при изменении состояния среды транспортировки. В обоих случаях условная "стоимость" транспортировки по отдельному участку сети является параметром, по которому определяются наилучшие пути. Эффективность маршрутизации определяется тем, насколько адекватна "стоимость" текущему состоянию оборудования и грузопотока. Оба варианта по-своему реализуют механизм адаптации:

- фиксированная маршрутизация строится на долгосрочном прогнозе состояния сети. Установленные маршруты не изменяются в течение длительного времени;

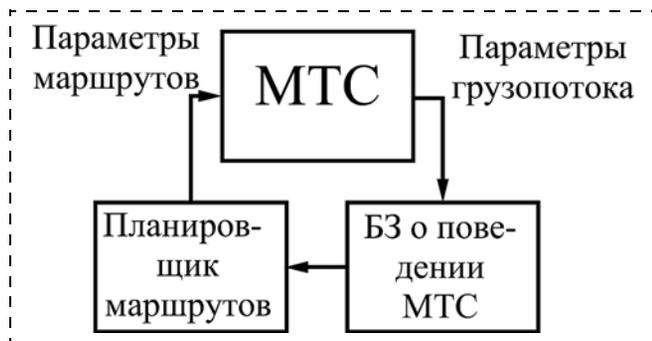


Рис. 1. Схема адаптации МТС

- динамическая маршрутизация не использует прогнозирование, подстраиваясь под наблюдаемое состояние сети.

Неопределенность, изменчивость условий транспортировки заставляют использовать модели адаптивной маршрутизации, ориентированные на знания. В этом направлении предлагались различные подходы, определяемые источником и формой представления знаний [5–10]. Однако особенности функционирования МТС не дают возможности непосредственно применить полученные результаты.

Рассмотрим следующую схему адаптации к перегрузкам (рис. 1). Состояние грузопотока в МТС оценивает эксперт. Свои наблюдения и выводы он фиксирует в базе знаний. На основе этих знаний строится прогноз загруженности МТС и стратегия маршрутизации. В соответствии со стратегией контроллеры корректируют свои маршрутные таблицы на временном интервале прогноза.

Адаптация, таким образом, реализуется двумя последовательными процедурами: интеллектуальным прогнозированием загруженности сети и динамической маршрутизацией в соответствии с прогнозом.

В качестве системы интеллектуального наблюдения рассмотрим эксперта, способного описать результаты своего наблюдения в виде знаний. Знания отражают характер изменения грузопотока сети на различных временных интервалах работы. Такое представление вполне уместно, например, для МТС крупного аэропорта. Операторы способны указать, насколько точно соблюдается расписание появления партий багажа в аэропорту, каков ориентировочный объем партий, свойства единиц груза (габаритные размеры, вид упаковки, форма, масса), возможные точки возникновения заторов потока, области перегрузки.

Будем считать, что эксперт, наблюдающий за работающей МТС, способен:

- оценивать загруженность отдельных участков сети соответственно принятой шкале и указывать границы таких подсетей на схеме сети;
- фиксировать временные интервалы наблюдения. Любая оценка загруженности подсети, таким образом, получает временную привязку;
- обобщать собственные наблюдения и прогнозировать поведение МТС. По отдельным фактам наблюдения изменения загруженности эксперт указывает подсети и их загруженность в будущем. Обобщение, таким образом, имеет пространственную, временную и семантическую привязку.

Знание эксперта представляется последовательностью  $s_k(k = \overline{1, |S|})$  образов ситуаций, каждый из которых имеет следующую структуру:

$$s_k = \langle N_k, v_k, \Delta t_k \rangle,$$

где  $N_k$  — подсеть МТС;  $v_k$  — экспертная оценка загруженности подсети;  $\Delta t_k$  — прогнозируемый интервал времени стабильности уровня загруженности подсети. Образный ряд  $s_k(k = \overline{1, |S|})$  является

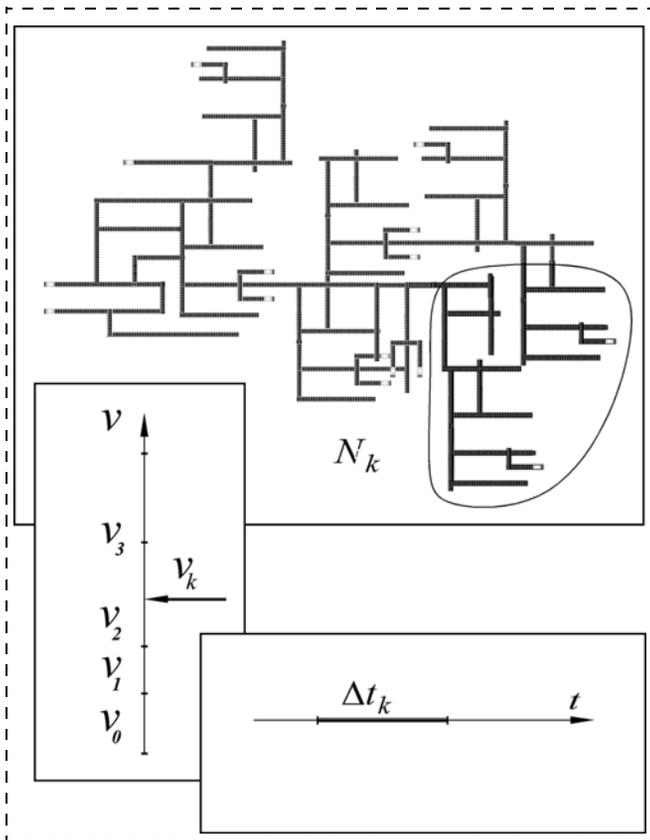


Рис. 2. Образное представление знания о загрузке МТС

формой представления опыта эксперта, решающе- го задачу повышения эффективности МТС.

На рис. 2 приведен пример визуализации обра- за. Каждая из рамок на рисунке соответствует независимым базам данных — пространственной о размещении компонентов МТС ( $N_k$ ), временной о положении временных интервалов ( $\Delta t_k$ ) и семанти- ческой об уровнях загрузки ( $v_k$ ). Элементы образа связаны ссылками. Наличие системы визуализа- ции образов ситуаций играет решающую роль в адаптации системы в целом. Именно здесь обеспе- чивается необходимое качество знаний — полнота, непротиворечивость, отсутствие избыточности, достоверность, возможность повторного использо- вания.

### Прогнозирование грузопотока с использованием образов прецедентов

Прецедентный анализ относится к одному из наиболее распространенных механизмов принятия решений на основе опыта [2]. Рассмотрим особен- ность его применения к решению задачи (1) — на- хождению участков МТС, подверженных перегрузке на интервале времени  $[t, t + t^*]$ . Визуально прогноз представляется последовательностью схем МТС с указанием стоимостей транспортировки по отдель- ным сегментам. Формально решением является описание  $w_{f_i}(t)$  на интервале  $[t, t + t^*]$ .

Традиционно прецедентный анализ предусмат- ривает сравнение ситуаций  $S_i(A)$  в пространстве признаков  $A$  [2]. Близость ситуаций оценивается принятой метрикой

$$D(S_a, S_b) = \|S_a(A) - S_b(A)\|. \quad (2)$$

Далее предполагают, что в близких ситуациях применимы похожие решения, и соответственным образом конструируют новое решение. Подобный механизм обладает недостатком: наблюдаемые си- туации фиксируются как точки признакового про- странства  $A$ , а достоверность оценки их близости определяется исключительно логикой реализации метрики (2). В системах гибридного интеллекта име- ется возможность повышать достоверность оценки близости ситуаций за счет расширения опытных знаний. Ситуации представляются не точками, а областями признакового пространства  $A$  [11]. Проиллюстрируем это на примере (рис. 3). Пусть ситуации  $S_a, S_b, S_c$  имеют временную привязку (рис. 3, а). Очевидно, что по расстоянию на вре- менной оси ситуации ( $S_b, S_c$ ) более близки, чем ( $S_a, S_b$ ). Однако предположим, что эксперт описал возможные отклонения временной привязки, ко- торые возможны в реальности и при этом не ме- няют сути ситуаций. Этим отклонениям соответст- вуют области, показанные на рис. 3, б. Близость ситуаций в таком случае отображается как степень перекрытия областей. Можно видеть, что ( $S_a, S_b$ ) при таком подходе более близки, чем ( $S_b, S_c$ ). Досто- верность оценки близости повышается благодаря активности эксперта и расширению знаний о каж- дой ситуации.

Таким образом, представляется целесообразным хранить знания в виде образов ситуаций  $I(S_i(A))$ . Образ ситуации включает в себя все допустимые преобразования конкретной ситуации, не меняю- щие ее сути:

$$I(S_i(A)) = \{f_1, f_2, \dots, f_L\}.$$

Содержательно понятие "суть" ситуации отно- сится к сфере интуитивного мышления эксперта. Воспроизведение интуитивного мышления техни- ческими системами, как известно [1], связано с серьезными трудностями. Тем не менее, не формали- зуя понятие сути ситуации, можно получать обо- гащенное смыслом знание о ситуации. Обращает на себя внимание тот факт, что каждое преобразо- вание ситуации

$$f_n(S_i(A)) = S_i^{(n)}$$

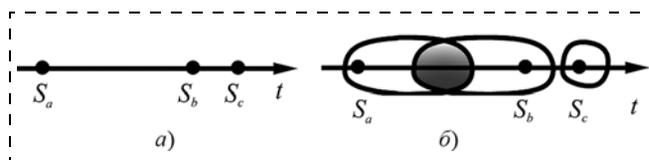


Рис. 3. Иллюстрация сравнения близости ситуаций

содержит в себе обобщение, сформулированное экспертом, но не логикой экспертной системы. На формальном уровне образное представление расширяет знания о ситуации:

$$S_i \subset \bigcup_n S_i^{(n)}.$$

Метрика близости ситуаций в таком случае принимает вид

$$D(S_a, S_b) = \|I(S_a(A)) - I(S_b(A))\|.$$

С практической точки зрения, преобразования  $f_n$  должны быть визуализируемыми (понятными эксперту) областями в признаковых пространствах (см. рис. 2). В этом случае мерой близости ситуаций является площадь пересечения областей, т. е.

$$D(S_a, S_b) = \sum_n k_{f_n} |f_n(S_a) \cap f_n(S_b)|,$$

где  $k_{f_n}$  — коэффициент значимости преобразования ситуации.

С учетом описанной концепции образного представления прецедентный анализ приобретает следующие особенности:

- проблемная ситуация задается набором возможных преобразований, т. е. представляется образно. Такой процесс сложнее констатации фактов, но открывает путь к более достоверным оценкам ситуаций и решениям;
- логический вывод в базе знаний предусматривает получение заключения о близости образа проблемной ситуации и ситуаций из предыдущего опыта;
- на основе одного или нескольких отобранных образов строится множество дефектов и функция затрат  $w_{f_i}(t)$  в границах прогноза  $[t, t + t^*]$ .

Полученные данные задают стратегию маршрутизации в МТС.

#### Определение кратчайших путей соответственно стратегии маршрутизации

Для реализации стратегии маршрутизации должны быть построены маршрутные таблицы каждого из узлов сети. Поскольку стоимости транспортировки по сегментам сети изменяются с течением времени, непосредственное применение алгоритма Форда—Уршалла [1] невозможно. Рассмотрим модификацию данного алгоритма на случай дискретного представления времени.

Пусть временной период прогноза представлен в единицах времени:

$$\Delta t = \min_{i,j} t_{ij},$$

где  $t_{ij}$  — время транспортировки единицы груза из узла  $s$  в узел  $j$ . Тогда каждому узлу  $q$  соответствует дискретная последовательность стоимости транспортировки в моменты времени  $0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, H\Delta t$ :

$$w_{qm}(t) = \{w_{qm}^{(i)}\}, m = \overline{1, m_q}, i = \overline{1, H},$$

где  $m_q$  — число выходных конвейеров узла с номером  $q$ .

Обозначим  $d_{qm}$ ,  $m = \overline{1, m_q}$ , время транспортировки груза из узла с номером  $q$  в узел с номером  $m$  в единицах времени  $\Delta t$ . Тогда стоимость транспортировки из узла  $q$  в узел  $u$  через узел  $p$  будет вычисляться как

$$w_{qu}^{(i)} = w_{qp}^{(i)} + w_{pu}^{(i+d_{qp})},$$

что позволяет учитывать достижимость узлов за заданное время транспортировки.

Для учета времени достижимости узлов элементы векторов  $w_{qm}^{(i)}$  с индексами  $0 < i < d_{qp}$  следует помечать специальным образом и анализировать при сравнении маршрутов. Сравнение приобретает специфику. Причина в том, что всякий маршрут характеризуется парой  $(T, W)$ , где  $T$  — время прохождения маршрута,  $W$  — его стоимость. Принцип выявления кратчайшего маршрута должен конкретизироваться в реализации.

Рассмотрим пример использования алгоритма. На рис. 4 показана сеть. Пусть прогноз стоимости транспортировки задан для пяти единиц времени. Для каждого узла эти значения представляются списками:

$$w_{12} = \{2, 3, 6, 7, 1\}, w_{13} = \{4, 2, 1, 5, 8\},$$

$$w_{14} = \{5, 5, 6, 6, 8\},$$

$$w_{24} = \{2, 1, 2, 1, 1\}, w_{34} = \{1, 1, 2, 2, 2\}.$$

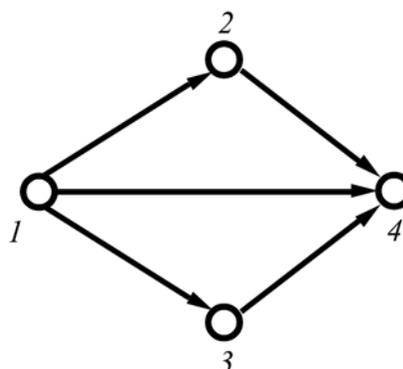


Рис. 4. Пример сети

Обозначим символом \* несущественные значения элементов списка, которые возникают при анализе любой пары несмежных вершин. Число символов \* равно числу промежуточных вершин между ними. В приведенном примере мы считаем, что время перемещения по любой дуге составляет ровно одну единицу  $\Delta t$ . Соответственно,  $d_{qm} = 1$ ,  $m = \overline{1, m_q}$ . Тогда получим следующие векторы стоимости для передачи из узла  $q$  в узел  $u$  через узел  $p$  (обозначено как  $q \rightarrow p \rightarrow u$ ):

$1 \rightarrow 2 \rightarrow 4$ : {\*, 3, 5, 7, 8};  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ : {\*, 5, 4, 3, 7};  
 $1 \rightarrow 4$ : {5, 5, 6, 6, 8}.

Можно видеть, что транспортировка из узла 1 в узел 4 может быть выполнена либо за 5 единиц стоимости без задержки, либо за 3 единицы стоимости с задержкой на один интервал времени  $\Delta t$ .

### Оценки эффективности адаптации

Эффективность адаптации определяется снижением стоимости транспортировки соответственно постановке задачи (1). При отсутствии адаптации к меняющейся загрузке сети растет потенциальный ущерб от возникновения заторов. В наихудшем случае эта величина на интервале времени  $T$  составит

$$W_{\max} = \frac{T}{t^*} \sum_{f_i} w_{f_i},$$

где  $t^*$  — усредненный интервал транспортировки партии груза через МТС. При наличии адаптации из всех возможных маршрутов выбирается наилучший. Вероятность такого события

$$P = \frac{N_0}{N_{\Sigma}}.$$

Здесь  $N_{\Sigma}$  — общее число маршрутов,  $N_0$  — число маршрутов с отсутствием потерь на ликвидацию заторов. Средний ущерб в таком случае

$$\overline{W} = (1 - P)W_{\max}.$$

Приведенные соотношения позволяют сделать следующие выводы:

1) выигрш от применения адаптивного механизма растет для МТС, эксплуатирующихся в условиях возможного появления большого числа дефектов  $f_i \subseteq F$  на интервале транспортировки партии груза. Слабая предсказуемость возникновения перегрузки увеличивает риск (ущерб) на продолжительных интервалах эксплуатации;

2) для слабо разветвленных МТС  $P \rightarrow 1$ , что может сделать эффект адаптации незначительным. Существование "обходных" маршрутов является важным фактором, определяющим эффект адаптации. Заметим, что тот же смысл имеет насыщенность потоков в МТС. Если сеть работает в режиме максимальной загрузки, эффективность динамической маршрутизации падает.

### Заключение

Предложенный в работе механизм адаптации применим для любых механических систем, работающих в масштабе времени эксперта-наблюдателя. Если система управления обладает средствами накопления опыта наблюдения и разрешения аномальных ситуаций, возникает возможность создания контура адаптации, который использует гибридный интеллект. Специфическим средством управления в МТС является маршрутизация. Рассмотренный в работе темпоральный случай зависимости стоимости транспортировки по сети обобщает известный алгоритм динамической маршрутизации. Применение описанного способа адаптации даст наибольший эффект для МТС, эксплуатирующихся в нестабильных условиях при существенных изменениях интенсивности грузопотока.

*Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 13-07-13103 офи\_м\_РЖД и 12-01-00032.*

### Список литературы

1. **Black G., Vyatkin V.** Intelligent Distributed execution and cyber-physical design of Baggage Handling automation with IEC 61499 // Proc. IEEE Int. Conf. on Industrial Informatics. 2011. P. 573–578.
2. **Luger G. F.** Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving. Addison Wesley, 2004.
3. **Belyakov S., Bozhenyuk A., Rozenberg I.** Routing in the mechanical transport systems on the basis of knowledge // 14th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics CINTI 2013, Budapest, Hungary, November 19–21, 2013. P. 159–262.
4. **Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R. L., Stein C.** Introduction to Algorithms. 3rd. MIT Press. 2009.
5. **Corberán A., Prins C.** Recent results on arc routing problems: An annotated bibliography // Networks. 2010. V. 56, N. 1.
6. **Bode C., Irnich S.** In-depth analysis of pricing problem relaxations for the capacitated arc-routing problem. Technical Report LM-2013-02. URL: <http://logistik.bwl.uni-mainz.de/158.php> (дата обращения: 17.05.2014).
7. **Drexel M., Schneider M.** A Survey of Location-Routing Problems. Technical Report LM-2013-03. URL: [http://wiwi.uni-mainz.de/Dateien/DP\\_1309.pdf](http://wiwi.uni-mainz.de/Dateien/DP_1309.pdf) (дата обращения: 17.05.2014).
8. **Казаков А. Л., Лемперт А. А.** Об одном подходе к решению задач оптимизации, возникающих в транспортной логистике // Автоматика и телемеханика. 2011. № 7. С. 50–57.
9. **Швецов В. И.** Математическое моделирование транспортных потоков // Автоматика и телемеханика. 2003. № 11. С. 3–46.
10. **Гасников А. В., Кленов С. Л., Нурминский Е. А., Холодов Я. А., Шамрай Н. Б.** Введение в математическое моделирование транспортных потоков: учеб. пособие / Под ред. А. В. Гасникова. М.: МФТИ, 2010. 362 с.
11. **Беляков С. Л., Белякова М. Л., Савельева М. Н.** Прецедентный анализ образов в интеллектуальных геоинформационных системах // Информационные технологии. 2013. № 7. С. 22–25.

## Adaptation of Cargo Flow in the Mechanical Transport Systems Based on the Experience of his Observations

*In this paper we investigate the adaptation cargo flow to the emergence of local overloads in the mechanical transport system. The adaptation mechanism is based on the deflection of bypassing sections with high risk of occurrence of congestion cost. Routing is a means of flow control. The duplex adaptation procedure is proposed here. At the top level routing strategy is built by an expert, which reduces the flow in the network segments with predicted congestion. On the lower level of transport controllers the system strategy is implemented by dynamic routing. The forecast is based on the experiences with expert intensity of traffic in the system. The modified version of case analysis, which uses the concept of pictorial representation of situations, is offered. In contrast to the known methods, the figurative description of precedents increases the reliability of decision-making. The result of case analysis sets the time dependence of transport costs on separate network segments. The modification of the algorithm of dynamically build routing tables by controllers transport network is proposed. The algorithm considers the temporal dependence of the weights of transport network edges. A distinctive feature of this algorithm is the comparison of cost and time of transportation that allows finding the compromise between these two indicators. The relations to evaluate the effectiveness of the proposed method adaptation are given.*

**Keywords:** adaptation, flow control, intelligent transportation systems, precedent analysis, figurative representation, mechanical transport systems, routing

### References

1. Black G., Vyatkin V. Intelligent Distributed execution and cyber-physical design of Baggage Handling automation with IEC 61499. *Proc. IEEE Int. Conf. on Industrial Informatics*. 2011. P. 573–578.
2. Luger G. F. Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving. Addison Wesley, 2004.
3. Belyakov S., Bozhenyuk A., Rozenberg I. Routing in the mechanical transport systems on the basis of knowledge. *14th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics CINTI 2013*, Budapest, Hungary, November 19–21, 2013. P. 159–262.
4. Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R. L., Stein C. Introduction to Algorithms. 3rd. MIT Press. 2009.
5. Corberán A., Prins C. Recent results on arc routing problems: An annotated bibliography. *Networks*. V. 56, N. 1. 2010.
6. Bode C., Irnich S. In-depth analysis of pricing problem relaxations for the capacitated arc-routing problem. *Technical Report LM-2013-02*. URL: <http://logistik.bwl.uni-mainz.de/158.php> (date of treatment: 17.05.2014).
7. Drexel M., Schneider M. A Survey of Location-Routing Problems. Technical Report LM-2013-03. URL: [http://wiwi.uni-mainz.de/Dateien/DP\\_1309.pdf](http://wiwi.uni-mainz.de/Dateien/DP_1309.pdf) (date of treatment: 17.05.2014).
8. Kazakov A. L., Lempert A. A. Ob odnom podhode k resheniju zadach optimizacii, vznikajushhix v transportnoj logistike. *Avtomatika i telemekhanika*. 2011. N. 7. P. 50–57.
9. Shvecov V. I. Matematicheskoe modelirovanie transportnyh potokov // *Avtomatika i telemekhanika*. 2003. N. 11. P. 3–46.
10. Gasnikov A. V., Klenov S. L., Nurminskij E. A., Holodov Ja. A., Shamraj N. B. Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie transportnyh potokov: ucheb. posobie. Pod red. A. V. Gasnikova. M.: MFTI, 2010. 362 p.
11. Beljakov S. L., Beljakova M. L., Savel'eva M. N. Precedentnyj analiz obrazov v intellektual'nyh geoinformacionnyh sistemah. *Informacionnye tehnologii*. 2013. N 7. P. 22–25.

УДК 004.8

Н. Н. Чубуков, вед. инженер, metrolog.pribor@mail.ru,  
ООО "Институт развития автодорожного комплекса"

## Анализ проблем и перспективы интеллектуализации транспортных сетей

*Рассматриваются проблемы интеллектуализации управления дорожным движением в мегаполисах. Для анализа загруженности дорог в городе предложена решетчатая топология городской транспортной сети. Препятствующая формальному описанию транспортной сети неопределенность выражена через категорию энтропии, которая интерпретирована в понятиях предметной области. Обоснована перспективность использования сетевого интеллекта для повышения эффективности управления потоками городского транспорта.*

**Ключевые слова:** агломерация, аддитивное управление, интеллектуальная транспортная сеть, мегаполис, оператор, сетевой интеллект, темпоральность, трафик, фрактальная структура, энтропия

### Введение. Актуальность проблемы

На протяжении приблизительно полувека решение всех проблем автомобильного движения в мегаполисах и на автобанах видится мировой общественности в построении "умных дорог". Однако до сих пор об успехах предпринятых попыток

создания интеллектуальных транспортных систем (ИТС) можно судить лишь по отдельным положительным результатам.

Предпосылки для перехода на качественно новый уровень управления дорожным движением сложились только в течение двух последних десятилетий

в результате эволюционного прорыва в микроэлектронике и информатике. Произшедшие радикальные изменения в этих областях знаний побудили ученых всех утилитарных наук пересмотреть отношение к традиционным методам решения профильных задач. В прикладных исследованиях возникли тенденции к углубленному изучению закономерностей природных явлений и процессов жизнедеятельности живых систем в целях их применения для рационального использования всей полноты наличествующих ресурсов, повышения быстродействия обработки данных и точности результатов, совершенствования управления в целом. Некоторые современные технические системы по сложности сравнимы с высшей нервной деятельностью человека и значительно превосходят человеческое мышление по размаху решаемых задач.

Выполнению автодорожной отрасли предусмотренных [1] практических действий, направленных на наискорейшее повышение степени автоматизации и интеллектуализации процессов регулирования дорожного движения, препятствует специфичность объекта управления, состоящая в бесконечной и непредсказуемой изменчивости автомобильных потоков на обширных территориях городской агломерации. Формальное описание транспортной сети для организации эффективного управления на сегодняшний день возможно только с привлечением методов хаотической динамики, весьма непростых для создания на их основе программных продуктов.

Новая особенность ситуации в транспортном комплексе состоит в том, что в настоящее время достигнута практически полная наблюдаемость автодорог с применением самых передовых инженерных и информационных решений. Постоянно расширяющийся ассортимент технических средств, использующих эти решения, включает оборудование на базе глобальной навигационной системы ГЛОНАСС, аппаратуры цифрового видеонаблюдения и распознавания, оптико-электронных приборов связи, систем RFID-идентификации. Общедоступными стали интернет-ресурсы, на которых в реальном времени размещается схема загруженности дорог.

Впрочем, любая степень технического совершенства средств первичного отбора информации от объекта аналогична развитию скорее глаза, чем мозга — разумность систем от этого не повышается. Сама по себе визуализированная информация, например, данные космической съемки, показывающие с высоким разрешением картину перегруженного автомобилями мегаполиса с точностью до единичного транспортного средства, не дает решения по оптимальному управлению светофорами на конкретном перекрестке.

Уровень развития современных информационно-коммуникационных и компьютерных технологий также создает прочную стартовую платформу для наращивания сложности управления транспортом, поскольку обеспечивает возможность обработки и мгновенной передачи огромного количества данных

на любые расстояния. Но и эта важная составляющая научно-технического прогресса подобна скорее мозгу как носителю разума, но не разуму как таковому.

Решение проблемы интеллектуального управления транспортом неразрывно связано с нахождением способа преобразования исходной информации в математическую модель, отвечающую целям управления. Переменные параметры такой модели должны отражать в реальном времени состояние дорожной обстановки и быть применимыми для анализа рисков возникновения критических ситуаций при различных сценариях развития событий, формирования управляющих воздействий, принятия взвешенных решений по выбору альтернативных стратегий управления, а также для реализации наилучшего для текущих условий закона управления с минимальным вмешательством человека.

## 1. Проблематика

Незаконмерно и резко проявляющиеся возмущения дорожной обстановки не могут быть эффективно нивелированы существующей системой регулирования движения автотранспорта, которая реализуется на правовой основе ПДД дорожными знаками, разметкой, светофорами, сигналами регулировщиков и настроена в основном на преобладающие параметры трафика. Эта система постоянно перегружена и дестабилизирована сложностью и динамичностью объекта, которым она управляет. Эффективность корректирующих воздействий при возникновении непредсказуемых ситуаций или отклонениях параметров движения от ожидаемых значений бывает крайне низка, что предопределяет необходимость организации гибкого интерактивного управления.

Рассмотрим основные трудности, возникающие на пути интеллектуализации управления дорожным движением в условиях современного города.

*Первое препятствие* возникает вследствие неполного соответствия идеологии моделирования объекту и целям управления. Обоснованность концепции, ее глубина и необходимая детализация проработки являются определяющими условиями успеха создания интеллектуальной системы. Известно, что любая задача решается с точностью до ее постановки. Недоучет значимых факторов в угоду простоте применяемых методов ведет к примитивизации объекта и потерям существенной информации. Переусложнение незначительными деталями, напротив, вызывает избыточность модели, повышающую риски возникновения ошибок управления. Также негативно сказываются как излишне жесткая детерминированность, так и чрезмерное увлечение вероятностным описанием процессов.

Важным идеологическим аспектом разработки ИТС, на котором часто ввиду его многосложности не акцентируется внимание, но который, тем не менее, требует полной ясности, является критериальный синтез. Он связан с формированием метриче-

ского пространства, координатные оси которого должны отражать качественные стороны объекта управления и среды, а градации нанесенных на этих осях шкал — количественно характеризовать приближение текущего состояния транспортных потоков к некоторому идеальному состоянию. В целом конструирование критерия представляет собой непростую и ответственную задачу, во многом определяющую интеллектуальность управления.

*Второе препятствие* заключается в ограниченности возможностей компьютерной техники, рост требований к вычислительным ресурсам которой нелинейно зависит от увеличения размерности задачи. Эта проблема носит название "проклятие размерности", она возникла с появлением первых ЭВМ и сохраняет свою актуальность до настоящего времени [2].

Транспортное движение города часто уподобляется протеканию "мотивированной" сжимаемой жидкости по каналам в соответствии с гидродинами-

ческой моделью Лайтхилла — Уизема — Ричардса [3, 4, 5]. На основе этой модели оценим объем вычислений для описания состояния транспортной сети мегаполиса по аналогии с медицинской задачей детального трехмерного моделирования кровеносной системы человека в форме процесса циркуляции несжимаемой жидкости в пористой среде. По мнению специалистов, ее решение требует применения суперкомпьютера эксафлопсного класса, способного выполнять свыше квинтиллиона ( $10^{18}$ ) операций в секунду [6]. Появление ЭВМ с такой производительностью по оптимистичным прогнозам ожидается к 2020 году.

Приведенная оценка может быть уточнена следующим образом. Представим транспортную модель города в виде топологии, узлы которой образуют изображенную на рис. 1 регулярную двойную решетку, которая по структуре и характеру связей примерно соответствует реальным транспортным сетям. Парные линии решетки символизируют встречные потоки на одной дороге.

Движение автотранспорта по транспортной сети в простейшем случае описывается системой линейных уравнений вида

$$AX = B, \quad (1)$$

где  $A$  — матрица состояния;  $X$  — вектор втекающих в зону моделирования потоков транспорта;  $B$  — вектор вытекающих транспортных потоков.

Информационная матрица состояния  $A$  для единичного типового автомобильного перекрестка имеет размерность  $4 \times 4$  и состоит из 16 расчетных элементов. Повышение размерности задачи на одну единицу, а это транспортное моделирование района, включающего перекрестки, непосредственно прилегающие к рассматриваемому, увеличивает размерность матрицы  $A$  в три раза, ее размерность становится  $12 \times 12$ . При этом число расчетных параметров вырастает до  $(4 \times 4) \times 9 = 144$ , что с учетом вспомогательных расчетов приводит к росту объема вычислений примерно на порядок. Описанная тенденция приближается функцией десятичного логарифма:

$$\lg V = R, \quad (2)$$

где  $V$  — объем вычислений;  $R$  — размерность моделируемого района.

Далее, возьмем отдельный перекресток за центр решетки и присвоим ему порядковый номер (№ 1). Оконтурим центр решетки и следующие уровни примыкающих к нему перекрестков концентрическими квадратами и пронумеруем их в направлении расходящейся от центра по часовой стрелке спирали (рис. 2). При этом индекс размерности  $R = \{1, 2, 3, \dots\}$  приобретает следующий смысл: 1 — контур 1-го уровня (центральный перекресток); 2 — контур 2-го уровня прилегания перекрестков к центральному; 3 — контур 3-го уровня, и т. д.

Анализ данной топологии позволил установить проявляющиеся в ней закономерности изменения

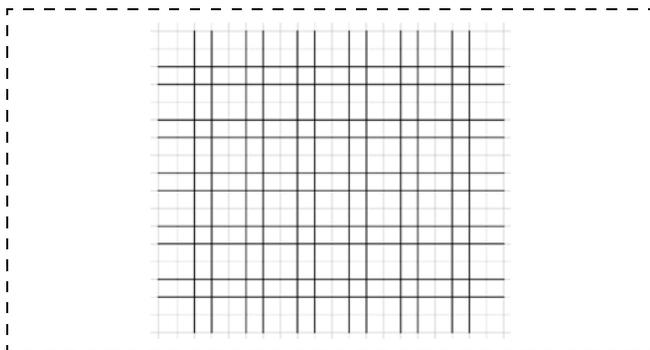


Рис. 1. Топологическая структура транспортной сети города "двойная решетка"

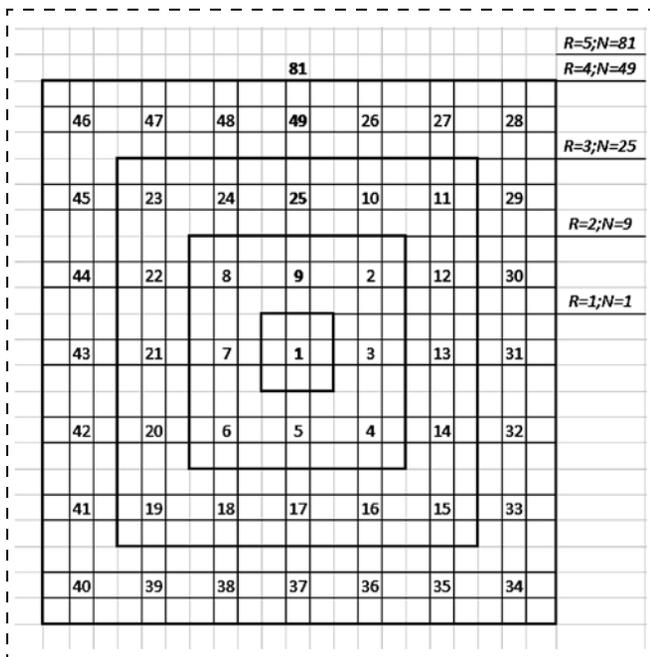


Рис. 2. Разметка топологии модели транспортной сети "двойная решетка":  
 $R$  — размерность уровня транспортной сети;  $N$  — число перекрестков внутри фиксированного уровня размерности

**Параметры и закономерности топологии транспортной сети "двойная решетка"**

Параметр	Обозначение	Числовые значения					Формула приближения ряда
		1	2	3	4	5	
Размерность сети	$R$	1	2	3	4	5	$R = \{1, 2, 3, \dots\}$
Число перекрестков	$N$	1	9	25	49	81	$N = (R + (R - 1))^2 = (2R - 1)^2$
Прирост числа перекрестков по сравнению с предыдущей размерностью	$\Delta N$	0	8	16	24	32	$\Delta N_{R+1} = \Delta N_R + 8$
Размерность матрицы состояния	$r$	$4 \times 4$	$12 \times 12$	$20 \times 20$	$28 \times 28$	$36 \times 36$	$r = (4 + \Delta N) \times (4 + \Delta N)$
Число элементов матрицы состояния	$n$	16	144	400	784	1296	$n = 4 \times 4 \times N = 2^4 \times N$

параметров вычислений с ростом размерности. Аппроксимирующие данные закономерности формулы приведены в правом столбце таблицы.

Зависимость объема вычислений от размерности согласно (2) имеет вид

$$V = 10^R. \tag{3}$$

Число перекрестков  $N$  и размерность  $R$  связаны выражением

$$N = (2R - 1)^2. \tag{4}$$

Подставив число регулируемых перекрестков в Москве ( $N \approx 1800$ ) в левую часть квадратного уравнения (4), приведем его к стандартному виду:

$$R^2 - R - 450 = 0. \tag{5}$$

Решение (5) позволяет приблизительно рассчитать размерность транспортной сети, охватывающей 1800 регулируемых перекрестков в Москве, которая составит  $R = 21$ .

Очевидно, уточнение путем расчетов необходимого объема вычислений для мониторинга дорожного движения в городе не добавляет оптимизма. Потребная производительность сервера составит согласно (3) примерно  $V = 10^{21}$  операций в секунду. В отношении полученных по методу аналогий и расчетным способом оценок будет уместным привести ироничный закон Мэрфи: "Если размерность задачи меньше трех, она тривиальна, а если больше восьми — она не имеет решения".

*Третье препятствие* вытекает из предыдущего и усугубляет его. Большой объем вычислений порождает новый фактор неопределенности, который нельзя недооценивать. Он проявляется в лавинообразном накоплении погрешностей последовательных расчетов при увеличении размерности задачи. Оказывается, что даже в случае создания суперЭВМ трансформации неточностей исходных данных, нарастая по ходу обработки, перечеркивают пользу от расчетов.

Обоснует данное утверждение. Любую структуру вычислительной сети можно привести к последовательному виду. Вычислительная цепь  $k$  последовательных операций схематично представлена на рис. 3.

Обычно при учете неопределенности вычислений постулируется равнозначность погрешностей звеньев в смысле их независимости и принадлежности к одному распределению, что позволяет учитывать их достаточно простыми методическими

приемами. Однако в реальных практических задачах, в особенности при больших масштабах обработки, такое допущение часто оказывается неоправданным. Из рис. 3 видно, что преобразованию входного сигнала  $k$ -го звена в выходной соответствует функциональная зависимость:

$$X_{k \text{ вых}} = \Phi_k(X_{k \text{ вх}}). \tag{6}$$

Последовательное соединение звеньев вычислительной цепи характеризуется тем, что выходной сигнал каждого предыдущего ( $k - 1$ )-го звена вместе с входящей в него погрешностью, унаследованной от ( $k - 2$ )-го звена, является входом для последующего. И так далее, до  $k - (k - 1)$ -го звена. Неопределенность, вызванная трансформацией неточностей выхода ( $k - 1$ )-го звена функцией преобразования  $k$ -го звена  $\Phi_k(X_{k \text{ вх}})$ , нормируется наследуемой погрешностью  $\delta_k^H$ .

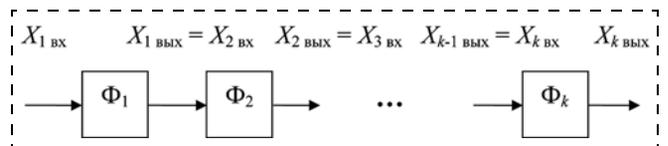
Кроме того, имеет место собственная погрешность  $k$ -го звена  $\delta_k^C$  вследствие потерь точности от округления промежуточных результатов, использования заведомо приближенных методов расчета (трансцендентных уравнений, итерационных процедур, разложения в ряды и т. п.).

Собственная погрешность, в свою очередь, трансформируется в последующие звенья, усугубляя наследуемую погрешность цепи. При этом функция преобразования  $k$ -го звена имеет вид

$$\begin{aligned} X_{k \text{ вых}} &= \Phi_k(X_{k \text{ вх}} + \delta_{k-1}) + \delta_k^C = \\ &= \Phi_k(X_{k \text{ вх}}) + \delta_k^H + \delta_k^C. \end{aligned} \tag{7}$$

Обобщенная функция преобразования вычислительной цепи в развернутом виде запишется следующим образом:

$$X_{\text{вых}} = \Phi_k(\Phi_{k-1}(\Phi_{k-2}(\dots \Phi_2(\Phi_1(X_{\text{вх}}) + \delta_1) + \delta_2) \dots + \delta_{k-2}) + \delta_{k-1}) + \delta_k). \tag{8}$$



**Рис. 3. Принципиальная схема последовательных вычислительных преобразований**

Обратим внимание на фрактальную структуру (8). Именно "матрешечный" вид этой формулы сообщает выраженный инкрементальный характер неопределенности в ходе расчетов. Многообразие источников возникновения и непредсказуемый характер проявления погрешностей звеньев цепи (8) порождают непреодолимые сложности их учета и компенсации. Индекс  $k$  определяет длину вычислительной цепи. Его роль не всегда очевидна, но именно его вклад нередко становится решающим в обеспечении достоверности результатов. Так, в инженерных приложениях регрессионного анализа широко распространен метод наименьших квадратов, реализуемый обычно стандартной процедурой. При его применении выполняется обращение информационной матрицы, формируемой на основе результатов измерений. Эта операция существенно усиливает даже незначительные неточности в элементах матрицы, унаследованные от погрешностей датчиков, и способна полностью свести на нет работу по сбору данных. Длина вычислительных цепочек при расчете детерминанта, определяющая значение индекса  $k$ , экспоненциально зависит от размерности информационной матрицы, и только применением специальных приемов ее факторизации можно добиться снижения потерь полезной информации [7].

*Четвертое препятствие* определяется темпоральностью, являющейся неотъемлемым свойством транспортной сети и характеризующей временную сущность протекаемых в ней процессов. Темпоральная сложность обусловлена динамическими особенностями охваченных единым алгоритмом управления пространственно разнесенных объектов транспортной инфраструктуры. Она проявляется в существенной неравномерности скоростей потоков транспорта в районах города, в неоднозначности определения оптимальных временных отрезков наблюдения для устойчивого статистического оценивания текущих характеристик дорожного движения, в изменчивости эффективных временных горизонтов прогноза состояния в локальных областях транспортной сети, в сложности синхронизации динамических параметров потоков транспорта с циклами светофоров.

По сути, темпоральная причинность в транспортных сетях ограничивает применение для их описания классических методов динамического моделирования, таких как дифференциальное исчисление, преобразования Лапласа и Фурье. Преодоление данного препятствия может стать ключом для наделения транспортной сети свойством когерентности, позволяющим формировать "длинные" взаимопроникающие "зеленые волны".

И наконец, *пятое препятствие* вызвано необходимостью комплексного учета последних достижений научно-технического прогресса. Любая идеология быстро морально устаревает, если она недостаточно приспособлена к стремительным изменениям, диктуемым временем, не обеспечивает увязку дос-

тигнутого и прогнозируемого уровней технических решений, не предусматривает оперативного внедрения передовых технологий и новых математических методов.

Преодоление перечисленных трудностей, сопровождающих создание современных эффективных систем управления, традиционно достигается двумя путями: за счет повышения производительности компьютеров и путем совершенствования алгоритмов. Выше была показана ограниченность фактора наращивания вычислительной мощи ЭВМ для обеспечения достаточной сложности управления таким объектом, как городские транспортные потоки. Поэтому в дальнейшем будем опираться на интеллектуальный потенциал, заложенный в математических операторах [6].

Соответственно, на первый план в разработке ИТС выдвигается соблюдение требований по максимально достижимой формализации условий дорожного движения, корректности сбора исходных данных, логичности, целесообразности и компактности математического аппарата, обоснованности выбора расчетных методов и рациональности применения вычислительных процедур.

## 2. Соотношение хаотичности и порядка транспортной сети

Все перечисленные препятствия, возникающие при разработке ИТС, приводят в конечном счете к росту хаотичности, мерой которой является энтропия. Этот термин прошел полуторазековой эволюционный путь развития от термодинамической формулировки Клаузиуса в 1865 г. ("... часть внутренней энергии системы, которая не может быть превращена в работу") до одного из центральных понятий современной науки, через которое определяются такие глобальные категории, как информация, вероятность, неопределенность, неупорядоченность. Энтропия постепенно и уверенно утверждалась при описании систем самой различной природы. После энтропии Клаузиуса в термодинамике были последовательно открыты энтропии: Больцмана в статистической физике, Шеннона в теории информации, Колмогорова в теории динамических систем, фон Неймана в квантовой механике. Ее универсальность в 1996 г. отмечал Ю. Л. Климонтович [8]: "Среди различных макроскопических функций только энтропия  $S$  обладает совокупностью свойств, позволяющих использовать ее в качестве меры неопределенности (хаотичности) при статистическом описании процессов в макроскопических системах".

Применительно к транспортным сетям энтропия рассматривается в парадигме теории информации. Она характеризует необходимую для решения задачи часть знаний, которую невозможно получить имеющимися методами и средствами [9]. Недостаток знаний о свойствах объекта управления и среды, технические недостатки датчиков, методи-

ческие сложности преобразования исходных данных к требуемой форме, ограниченность математического аппарата для выработки эффективного закона управления составляют далеко не полный перечень проявлений энтропии. Ее основным источником является человек: непредсказуемое поведение пешехода, водителя или регулировщика способно мгновенно "сломать" любой налаженный и эффективный цикл управления.

Однозначная связь энтропии и информации прослеживается на основании выражения Шеннона [10]:

$$H + I = 1, \quad (9)$$

где  $H$  — энтропия;  $I$  — информация.

Развитие транспортной сети достигается получением снижающих энтропию порций информации, что соответствует в какой-то степени упорядочению хаоса. При этом порядок предполагает некоторую определенность пространственного или временного положения элементов системы и подразумевает наличие между ними устойчивых связей, существование закона или симметрии, которым подчиняются эти элементы, и возможность прогнозирования поведения системы.

Например, нумерация перекрестков города, показанная на рис. 2, и установленные закономерности, приведенные в таблице, несомненно, увеличивают порядок транспортной сети. Но этот порядок сам по себе недостаточен и бесполезен, пока он не согласован с задачей управления, для чего необходимо одновременное совпадение ряда условий: наличие эффективного критерия полезности, организация модели транспортной сети города таким образом, чтобы порядок можно было использовать в целях управления. И наконец, должна иметься возможность выделения критичных параметров порядка по определенным признакам, обеспечивающим перегруппировку упорядоченных данных в зависимости от решаемых подзадач. Этими признаками могут быть однотипность перекрестков, подобие конфигураций дорог, территориальная общность, степень загруженности и др.

### 3. Адаптация понятия энтропии к специфике транспортных сетей

Все глобальные понятия требуют уточнения при их использовании в конкретных предметных областях. Для транспортных сетей энтропия может быть интерпретирована на основе следующих рассуждений. Пусть существует множество транспортных средств  $n$ , которым при отсутствии дорог необходимо переместиться из пункта  $A$  в пункт  $B$ . Первоначально каждый водитель будет выбирать индивидуальные маршруты следования по бездорожью  $m$ , число которых может быть  $m \leq n$ .

В этом случае энтропия максимальна ( $H = \max$ ,  $I = \min$ ). Если пустить ситуацию на самотек, то с течением времени  $t$  число маршрутов движения будет постепенно уменьшаться, и по достижении через

период времени  $T$  некоторого предельного значения  $N$  суммарного числа проездов водители будут выбирать единственную, наиболее накатанную дорогу:

$$\lim_{\substack{n \rightarrow N \\ t \rightarrow T}} m = 1. \quad (10)$$

При этом в процессе снижения разнообразия маршрутов энтропия системы будет постепенно уменьшаться, а антиэнтропийные факторы — информация, порядок и организация — постепенно возрастать. Дорога, появившаяся в результате устойчивого повторяющегося предпочтения в индивидуальном выборе водителями автотранспорта, возникает по тому же принципу, что воронка на воде или след ручья после ливня. Эта дорога называется аттрактором, поскольку ее можно представить некой притягивающей линией, к которой сходятся все возможные траектории движения [11]. На данном этапе развития транспортной сети энтропия достигнет локального минимума, соответствующего на рис. 4 вертикали 1.

Проследим дальнейшую эволюцию транспортной сети. Если, к примеру, владельцы автотранспорта решат построить сообща дорогу, они вынуждены будут исходить из соображений экономии трудозатрат и времени и выберут по всеобщему согласию одну трассу, на которой можно будет меньше вырубать деревьев, корчевать пней, строить мостов.

Энтропия данной транспортной сети станет еще меньше. Единственный наилучший из всех маршрут будет выбран в результате согласования множества различных, несовпадающих интересов сторон. При этом будет использована дополнительная информация и проведены расчеты необходимого количества материалов (щебня, песка, асфальта), ширины обочин, числа полос движения, определена требуемая дорожная техника, порядок ее применения и др. Уровень энтропии на этом этапе развития транспортной сети определяется на рис. 4 вертикалью 2.

Если предположить, что всеми заинтересованными владельцами автотранспорта нанята серьезная проектная организация, то энтропия опять снизится, поскольку при выборе районов пролегания дороги и ее проектировании будет использо-

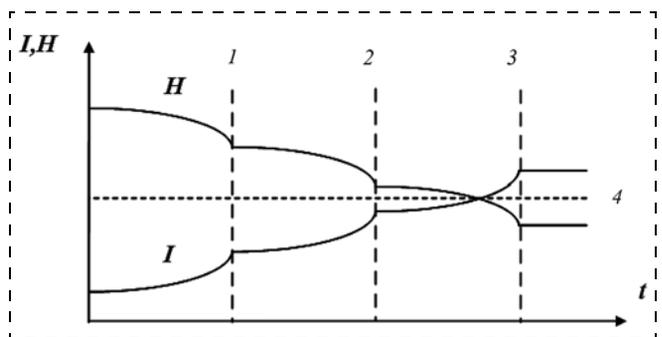


Рис. 4. Эволюционная динамика информационно-энтропийных преобразований при развитии транспортной сети

вано еще больше информации: опыт проектирования аналогичных объектов, современная мировая теория и практика дорожного строительства, финансово-экономический анализ, расчет эксплуатационных затрат на поддержание трассы в надлежащем состоянии, анализ проб грунта и климатических условий, прогноз развития транспортной инфраструктуры региона и множество других данных.

Ввод дороги в эксплуатацию также будет сопровождаться уменьшением энтропии, поскольку увеличится информированность пользователей, и появится определенность в движении благодаря указателям, развязкам и съездам. Строительство альтернативных автодорог дополнительно снизит энтропию, так как появится возможность выбора пути и оптимизации маршрута по различным критериям (время, расстояние, направление, стоимость). То же можно сказать и про развитие сопутствующих услуг: продуманное расположение автозаправочных станций, придорожных кафе и отелей обеспечит не только комфортность пути, но и уменьшит время остановок, увеличит безостановочный пробег.

После окончания строительства сети энтропия будет соответствовать уровню, отмеченному на рис. 4 вертикалью 3. Очевидно, при развитии транспортной сети спад энтропии имеет квазиступенчатый характер. Функции энтропии и информации в силу (9) зеркально симметричны относительно горизонтали 4. Деградация сети автодорог протекает приблизительно в обратном порядке, а соответствующий процесс будет отражать осевая симметрия рис. 4 относительно вертикали 3 [12].

Приведенные общие рассуждения показывают, что субъекты эволюционных процессов взаимодействуют и как бы передают друг другу роли для уменьшения энтропии: проектировщик систематизирует и проектирует, формируя задел для разработки. Разработчик создает материальную основу и передает готовый объект эксплуатанту. Эксплуатант поддерживает состояние дорог на уровне, приспособленном для пользователя, который, в свою очередь, дает обратную связь через обращения к организаторам движения. Содержащиеся в этих обращениях претензии и пожелания стимулируют развитие объекта в направлении некоторого изменяющегося идеала.

Таким образом, эволюционный механизм предполагает целенаправленное усложнение транспортной сети, реализуемое рядом взаимосвязанных этапов, на каждом из которых происходят: поиск и систематизация разнообразных сценариев развития, прагматический анализ альтернатив и выбор наиболее полезного для достижения цели варианта.

#### 4. Формирование модели идеального поведения системы

Цель управления заключается в удержании системы в области оптимума, характеризующейся зна-

чениями параметров движения в установленных пределах.

Чем совершеннее модель, тем ближе состояние объекта к идеалу, тем меньше энтропия. Гипотетически при формировании идеального поведения системы можно представить все что угодно без ограничений на технические решения и экономические условия. В соответствии с принципами идеальных систем [13] идеальная транспортная сеть должна обеспечивать перенос любых потоков автотранспорта из любого пункта  $A$  в любой пункт  $B$  городской агломерации, при любой загрузженности дорог  $z$ , мгновенно, с нулевыми затратами и максимальным комфортом.

Для каждого участника движения  $X$  предполагается наличие некоторого правила, реализуемого оператором

$$\begin{aligned} W(S, t) : X(A) &\Rightarrow X(B), A, B \in G, \\ S &\rightarrow S(AB), \\ t(z) &\rightarrow 0, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $X$  — индивидуальное транспортное средство;  $X(A)$ ,  $X(B)$  — нахождение индивидуального транспортного средства в пространственных координатах  $A$  и  $B$  соответственно;  $S(AB)$  — расстояние между пунктами  $A$  и  $B$  по прямой;  $G$  — область городской агломерации;  $z$  — загруженность дорог;  $t$  — время следования по маршруту  $(AB)$ .

Индивидуально для каждого пользователя в настоящее время задача (11) в какой-то степени уже решается современным навигатором в условиях реальной дорожной обстановки.

Для оптимизации управления в масштабах города задача имеет более сложную постановку. Ее условия могут включать не только текущее распределение транспортных средств по сети, но и прогноз такого распределения с учетом всей совокупности индивидуальных моделей (11). На основе этих данных должен быть выработан набор управляющих воздействий, который обеспечивает относительно равномерное распределение транспортных потоков по сети, ставящее всех участников движения примерно в равные условия по достижению своих целей. Важным является наличие принципиальной возможности формирования такого управления транспортными потоками, которое обеспечит достаточное приближение текущего состояния транспортной сети к идеалу, при ограничениях на время, скорость, загруженность дорог и другие параметры.

Одно из необходимых условий эффективного управления заключается в необходимости формирования модели интересов пользователей, которая позволяет обеспечить всем участникам движения наибольшую свободу выбора в рамках предоставляемых им возможностей. В любой момент они должны обладать необходимой полнотой информации для принятия независимого решения на изменение маршрута, скоростного режима или остановки.

Идеальная транспортная сеть может считаться аддитивной в том смысле, что основанное на ней

управление "дополняет" каждое транспортное средство достаточным опциональным набором, позволяющим учесть текущие и планируемые предпочтения каждого пользователя по условиям и возможностям перемещения. Реализуемая таким образом обратная связь между водителем и системой управления позволяет обеспечить наилучшие параметры маршрута и повысить комфортабельность движения. По аналогии с компьютерными играми аддитивность ИТС в отношении пользователей дорог в идеале означает воплощение эффекта дополненной реальности.

## 5. Перспективность сетевого мышления

Самая передовая на сегодняшний день методология управления макроскопическими объектами нелинейной динамики основана на концепции интеллектуальной адаптивной сети, насыщенной активными элементами. Управление сетью обеспечивается на основе значений текущих параметров состояния ее ячеек, оцениваемых большим числом датчиков, рассредоточенных по сети. Этим достигается распределенность всего объема расчетов по локальным вычислителям, а также оперативность и независимость реагирования системы управления транспортной сетью на ситуацию по месту. Более мелкие ячейки, сохраняя самостоятельность при формировании своих локально-оптимальных регуляторных свойств, соблюдают правило приоритетности интересов более крупных фрагментов и макрокомпонентов сети.

Сравним полученные ранее показатели централизованной модели с аналогичными показателями сетевой модели. Пусть городская транспортная сеть соответствует рассмотренной ранее топологии "двойная решетка", единичный перекресток описывается моделью (1), и в городе имеются  $N = 1800$  регулируемых перекрестков. При этом единый критерий оптимизации централизованной модели заменяется множеством частных критериев по числу разбиения агломерации локальными зонами. Иными словами, один объект управления размерностью  $R = 21$  с  $N = 1800$  элементов замещается  $N = 1800$  объектами регулирования единичной размерности ( $r = 1$ ). Объем вычислений  $V_c$  для описания состояния транспортной сети города согласно (3) составит 18 000 операций:

$$V_c = N \cdot 10^R = 1800 \cdot 10^1 = 1,8 \cdot 10^4. \quad (12)$$

Преимущество распределенных вычислений можно выразить в виде отношения объемов вычислений для единичного объекта размерности  $R = 21$  и  $N = 1800$  объектов единичной размерности:

$$V/V_c = 10^R/N \cdot 10^r = 10^{21}/1800 \cdot 10^1 \approx 5,55 \cdot 10^{17}. \quad (13)$$

Очевидно, применение сетевой модели позволяет примерно на 17 порядков снизить объем расчетов. При этом необходимые 18 000 операций в

секунду обеспечивает сегодня микропроцессорная техника среднего класса.

## Заключение

Рассмотренные в начале статьи препятствия для интеллектуального управления дорожным движением в городских условиях во многом могут быть сняты за счет применения решетчатой топологии для описания транспортной инфраструктуры города и основанной на ней модели сетевого управления. В этом случае обеспечиваются повышенные показатели гибкости, оперативности, территориальной масштабируемости и вычислительной экономичности управления. Распределенная обработка данных по сети, в силу параллельности и независимости производимых расчетов, обеспечивает укорачивание последовательных цепочек вычислений настолько, что наследуемая погрешность в них не успевает накапливаться до критических значений и перестает представлять серьезную угрозу точности. Темпоральность в сетевой модели ИТС остается препятствием, но уровень проблемности этого фактора резко понижается за счет автономности элементов сети и обусловленной этим зональности управления.

Таким образом, с точки зрения сложности решаемых задач и надежности системы управления в целом сетевая модель управления оказывается наиболее перспективной для построения интеллектуальных систем управления городским транспортом.

## Список литературы

1. **Транспортная** стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. Утв. распоряжением Правительства РФ от 22.11.2008 г. № 1734-р.
2. **Bellman R. E.** Adaptive Control Processes. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1961.
3. **Lighthill M. J., Whitham G. B.** On kinematic waves: II. Theory of traffic flow on long crowded roads // Proc. R. Soc. London, Ser. A. 1955. V. 229. P. 281—345.
4. **Richards P. I.** Shock Waves on the Highway // Oper. Res. 1956. V. 4. P. 4251.
5. **Уизем Дж.** Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977.
6. **Велхов Е. П.** Перспективы технологического перевооружения промышленности, науки и образования России на основе массовых суперкомпьютерных технологий // Вестник Российской Академии наук. 2009. Т. 79, № 3.
7. **Чубуков Н. Н.** Метод Халесского в задаче параметрической идентификации // Матер. XXII конф. молодых ученых и специалистов "Военная метрология XXI века", 32 ГНИИ, 1997. 5 с.
8. **Климентович Ю. Л.** Критерии относительной степени упорядоченности или хаотичности открытых систем // Успехи физических наук. 1996. Т. 166, № 11.
9. **Яглом А. М., Яглом И. М.** Вероятность и информация. М.: Наука, 1973.
10. **Волькенштейн М. В.** Энтропия и информация. М.: Наука, 1986.
11. **Никульчев Е. В.** Идентификация динамических систем на основе симметрий реконструированных аттракторов: Учеб. пособие. М.: МГУП, 2010. 100 с.
12. **Тархов С. А.** Эволюционная морфология транспортных сетей: методы анализа топологических закономерностей. М.: ИГ АН СССР, 1989. 221 с.
13. **Голдовский Б. И., Вайнерман М. И.** Рациональное творчество. М.: Речной транспорт, 1990.

## Analysis of Problems and Prospects of Intellectualization Transport Networks

*The problems that arise when solving actual problems for the transport sector improving traffic management in metropolitan areas. For the analysis of congestion in the transport network topology proposed "double lattice". The characteristic parameters for a given topology and patterns that can be used to develop interactive control characteristic of urban agglomerations conditions of high density and intensity of vehicular traffic. Obstructive formal description of the transport network chaotic traffic expressed in terms of entropy, which is interpreted in terms of the subject area. When considering a specific example of identified sources and shows the nature and manifestations of anti-entropic entropic phenomena in the course of evolution and degradation of transport networks. A model of an ideal system for traffic management in urban agglomerations. Perspectives use network intelligence to generate the control actions, and noted the benefits of distributed computing in comparison with the centralized model of the data. The quantitative ratio, showing that the network management provides a sufficiently high levels of reliability, flexibility, efficiency, scalability and territorial computational efficiency for effective management of urban road transport.*

**Keywords:** agglomeration, additive management, intelligent transportation network, metropolis, operator, network intelligence, temporality, traffic, fractal structure, entropy

### References

1. **Transportnaya** strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda. Utv. rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 22.11.2008. N. 1734-r.
2. **Bellman R. E.** Adaptive Control Processes. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1961.
3. **Lighthill M. J., Whitham G. B.** On kinematic waves: II. Theory of traffic flow on long crowded roads. *Proc. R. Soc. London, Ser. A.* 1955. V. 229. P. 281–345.
4. **Richards P. I.** Shock Waves on the Highway. *Oper. Res.* 1956. V. 4. P. 4251.
5. **Uizem Dzh.** Lineynye i nelineynye volny. M.: Mir, 1977.
6. **Velikhov E. P.** Perspektivy tekhnologicheskogo perevoorzheniya promyshlennosti, nauki i obrazovaniya Rossii na osnove massovykh superkomp'yuternykh tekhnologiy. *Vestnik Rossiyskoy Akademii nauk.* 2009. V. 79, N. 3.
7. **Chubukov N. N.** Metod Khalesskogo v zadache parametricheskoy identifikatsii // Mater. XXII konf. molodykh uchenykh i spetsialistov "Voennaya metrologiya XXI veka", 32 GNII, 1997. 5 p.
8. **Klimontovich Yu. L.** Kriterii odnositel'noy stepeni uporyadchennosti ili khaotichnosti otkrytykh sistem. *Uspekhi fizicheskikh nauk.* 1996. V. 166. N. 11.
9. **Yaglom A. M., Yaglom I. M.** Veroyatnost' i informatsiya. M.: Nauka, 1973.
10. **Vol'kenshteyn M. V.** Entropiya i informatsiya. M.: Nauka, 1986.
11. **Nikul'chev E. V.** Identifikatsiya dinamicheskikh sistem na osnove simmetriy rekonstruirovannykh attraktorov. Ucheb. posob. M.: MGUP, 2010. 100 p.
12. **Tarkhov S. A.** Evolyutsionnaya morfologiya transportnykh setey: metody analiza topologicheskikh zakonomernostey. M.: IG AN SSSR, 1989. 221 p.
13. **Goldovskiy B. I., Vaynerman M. I.** Ratsional'noe tvorchestvo. M.: Rechnoy transport, 1990.



### Тематика конференции:

проектирование и строительство различных объектов электроэнергетики, новейшие технологии для модернизации и реконструкции электростанций, ТЭЦ, АЭС, ГРЭС, ТЭС и других предприятий энергетики, повышение ресурса и эффективности турбин, котлов и другого оборудования, системы автоматизации и приборы КИП, оборудование для вентиляции и газоочистки, водоподготовки и водоочистки, переработка отходов, материалы для огнезащиты и антикоррозионной защиты, усиление и восстановление оборудования и сооружений, вопросы практического обеспечения промышленной и экологической безопасности объектов энергетики.

На конференции будут представлены новейшие решения, оборудование и разработки компаний России, Австрии, США, Германии, Финляндии, Швеции, Норвегии, Украины и других стран.



### Председатель оргкомитета:

Ермаков Алексей Владимирович  
тел.: +7 (905) 567-8767, e-mail: admin@intecheco.ru  
По всем вопросам обращаться в оргкомитет:  
105318, г. Москва, а/я 24, ООО "ИНТЕХЭКО"  
Андроников Игорь Николаевич  
тел.: +7 (499) 166-6420, +7 (916) 117-0275,  
факс: +7 (495) 737-7079 e-mail: admin@intecheco.ru  
сайт: www.intecheco.ru

УДК 681.518.3(5); 621.317.35

**Н. П. Будко**, студент, budko27@mail.ru,

Северо-Кавказский федеральный университет,

**П. А. Будко**, д-р техн. наук, проф., budko62@mail.ru, **А. И. Литвинов**, адъюнкт, litvinovaleks@mail.ru,

**А. М. Винограденко**, канд. техн. наук, доц., vino\_grad-82@mail.ru,

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, г. Санкт-Петербург

## Реализация кинетического метода контроля и диагностики технических средств

*Предложен метод неразрушающего контроля технических средств, направленный на повышение быстродействия контроля и достоверности идентификации технического состояния объекта контроля. Предложенный кинетический метод контроля и диагностики технических средств заключается в том, что формируют библиотеку описаний возможных технических ситуаций в объекте контроля и запоминают их в виде эталонных матриц технического состояния. На выходе датчика напряженности магнитного поля измеряют уровень сигнала, сдвигают по фазе измеренный сигнал, после чего измеренный и сдвинутый по фазе сигналы преобразуют в векторы цифровой последовательности, которые запоминают в виде матрицы технического состояния, проводят сравнение полученной матрицы с эталонными матрицами, а по наибольшему числу совпадений элементов сравниваемых матриц идентифицируют техническое состояние и место отказа в объекте контроля. Устройство, реализующее предложенный метод, состоит из источника переменного тока, датчика напряженности магнитного поля, объекта контроля, блока обработки сигнала, блока идентификации технического состояния и места отказа. Предложенный метод и реализующее его устройство относятся к области контрольно-измерительной техники и могут быть использованы при бесконтактном контроле параметров технических средств, их режимов работы, а также для определения класса их технического состояния.*

**Ключевые слова:** техническое средство, диаграмма состояния, контроль, диагностика, идентификация, техническое состояние, кинетика

### Введение

В предыдущей статье авторов [1] предложены основные подходы, связанные с разработкой кинетического метода контроля и диагностики технических средств. Реализация данного метода опирается на использование неразрушающих методов контроля и диагностики, применяемых в различных отраслях промышленной электроники и электротехники [2–5]. Так, известен метод использования квазиорбит для реализации задачи образного анализа технического состояния (ТС) подшипников при экспресс-диагностике роторных машин, основанный на использовании фигур Лиссажу двух сигналов вибродатчиков, установленных взаимно перпендикулярно на опоре электродвигателя [2]. Также известен метод диагностирования, основанный на регистрации изменения тока питания объекта контроля (ОК) [3]. Данный метод заключается в том, что ток питания любого элемента ОК зависит от ТС этого элемента, поэтому при его переходе из одного состояния в другое изменяется общий ток, потребляемый ОК. Принцип локализации отказавшего элемента при реализации метода заключается в подаче на вход ОК импульса определенной длительности, при этом проверяемые элементы, входящие в ОК, должны быть включены последовательно. Известен метод экспресс-диагностики выпрямительных элементов блоков питания, заключающийся в регистрации датчиком, размещенным вблизи

трансформатора, временной зависимости магнитного поля рассеяния трансформатора, входящего в состав блока питания [4]. Наиболее близким по технической сущности к предлагаемому методу является способ визуального контроля параметров энергопотребления и диагностики ТС электрооборудования (ЭО) переменного тока [5], основанный на получении информации о параметрах энергопотребления и ТС ЭО по результатам анализа характера изменения формы тока, потребляемого ЭО.

Однако к недостаткам данных методов можно отнести:

- некоторую "зашумленность" сигнала из-за наличия высокочастотных составляющих, что ограничивает область их применения в решении задач экспресс-диагностики в качестве дополнительного к основному информационному признаку;
- относительно низкую чувствительность к малым отклонениям параметров ОК;
- большое время, необходимое для контроля ТС ОК переменного тока, и субъективность выводов по результатам контроля, поскольку для идентификации ТС оператору необходимо визуально сравнить  $X$  значений коэффициента взаимного подобия эталонной и полученной кривой (мнемонической диаграммы), при этом  $X \gg 1$ , что обусловлено необходимостью обеспечения требуемой точности идентификации ТС ОК (минимизацией вероятности ошибочной идентификации).

Задача, рассматриваемая в статье, — повышение быстродействия и достоверности идентификации ТС ОК и расширение области применения предложенного метода.

### Сущность кинетического метода контроля и диагностики технических средств

Предложен кинетический метод контроля и диагностики технических средств, при котором

- на выходе датчика напряженности магнитного поля, индуктивно связанного с проводами электропитания ОК, измеряют уровень сигнала, пропорционального напряженности изменяющегося во времени внешнего магнитного поля, создаваемого ОК в рабочем режиме;
- сдвигают по фазе измеренный сигнал на  $\Delta\varphi$ ;
- по полученным данным идентифицируют ТС ОК;
- дополнительно формируют библиотеку описаний возможных технических ситуаций в ОК;
- возможные технические ситуации запоминают в виде эталонных матриц ТС (МТС) размерностью  $N \times N$ ;
- генерируют совокупность  $N$  стробирующих импульсов через интервалы времени  $\Delta t = T/N$ , где  $T$  — период измеренного сигнала,  $N \geq 2$  число измерений в интервале  $T$ ;
- измеряют мгновенные значения сигналов  $U_{\text{ДНМП}}$  с выхода датчика напряженности магнитного

поля (ДНМП) и сигнала дифференцирующего элемента (ДЭ)  $U_{\text{ДЭ}}$ , сдвинутого по фазе на  $\Delta\varphi$ ;

- результаты  $n$ -го измерения мгновенных значений  $U_{\text{ДНМП}}$  и  $U_{\text{ДЭ}}$ , где  $n = 1, 2, \dots, N$ , оцифровывают и запоминают в виде векторов цифровой последовательности длиной  $N$ ;
- из полученных векторов формируют МТС размерностью  $N \times N$ , которую сравнивают с эталонными МТС;
- идентифицируют ТС ОК по наибольшему числу совпадений элементов данных матриц. При этом индуктивная связь датчика магнитного поля с проводами ОК выполнена по схеме трансформатора тока. Сдвиг по фазе на  $\Delta\varphi$  сигнала  $U_{\text{ДНМП}}$  выполняют с помощью операции дифференцирования.

Сущность предлагаемого метода контроля и диагностики технических средств состоит в представлении диагностического пространства, содержащего информационные признаки отказов ОК, в виде векторов цифровой последовательности, из которых формируют МТС. Идентификация ТС и места отказа в ОК осуществляется на основании анализа изменений в цифровых последовательностях сформированных МТС. При этом предлагается контроль ТС ОК осуществлять в два этапа (анализа и идентификации): на первом этапе формируют библиотеку эталонных описаний возможных ТС ОК (инфор-

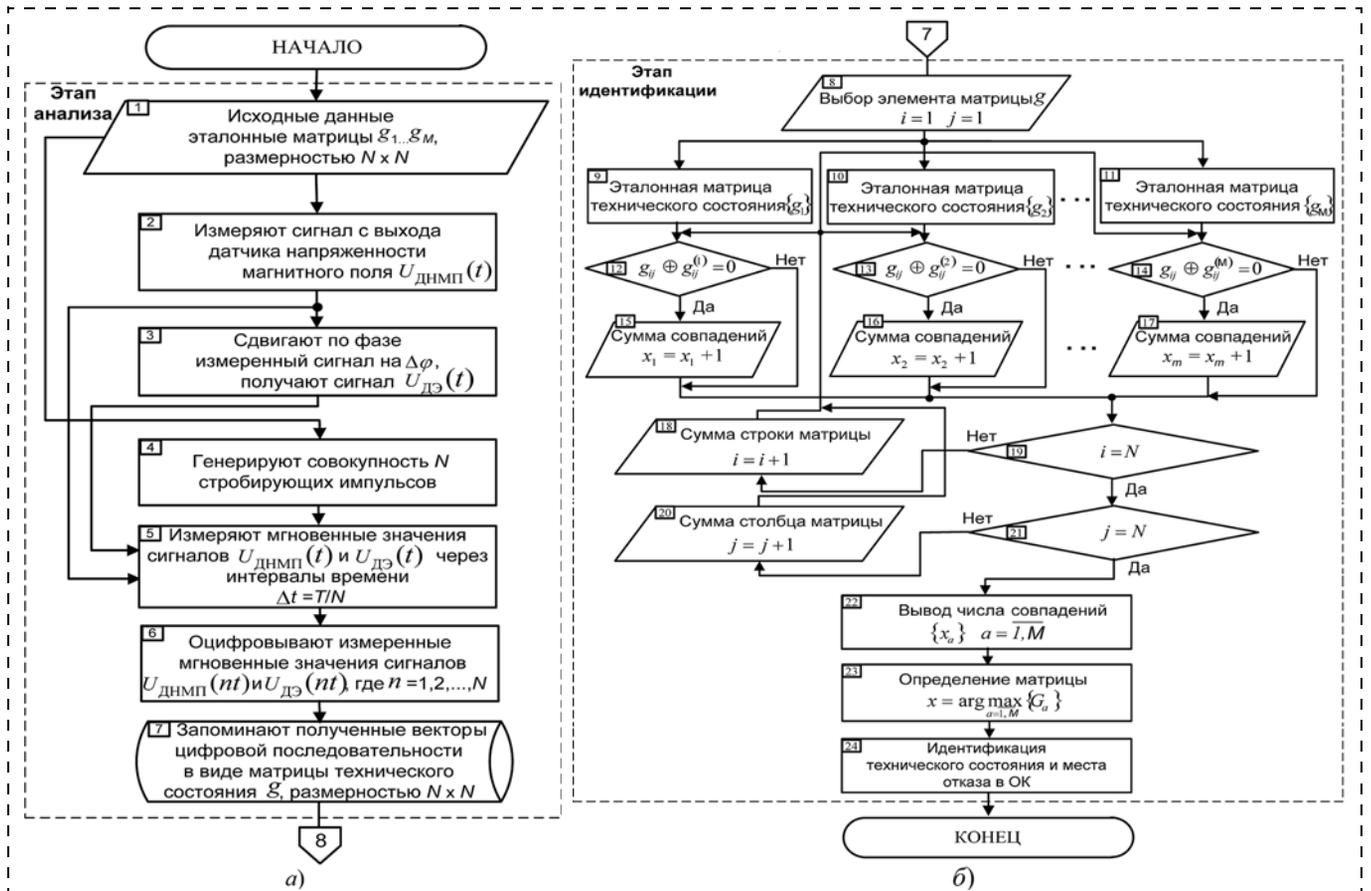


Рис. 1. Алгоритм, реализующий двухэтапный кинетический метод контроля и диагностики технических средств: а — этап анализа; б — этап идентификации

мационных признаков отказов), преобразуя измеренный сигнал в МТС  $g_{1...g_M}$ , размерностью  $N \times N$ , которую запоминают, а на втором этапе поэлементно сравнивают полученную МТС с эталонными МТС, идентифицируют ТС ОК по наибольшему числу совпадений элементов сравниваемых матриц.

### Алгоритм кинетического метода контроля и диагностики технических средств

Алгоритм предложенного метода представлен на рис. 1, а, б.

- Первым этапом алгоритма является этап анализа (рис. 1, а), на котором
- на шаге 1 формируют библиотеку описаний возможных технических ситуаций в ОК и запоминают их в виде эталонных МТС  $g_m$  размерностью  $N \times N$ , где  $m = 1, 2, \dots, M$  — число возможных технических ситуаций в ЭО. Пример библиотеки возможных технических ситуаций в ОК приведен на рис. 2, а—д,  $M=5$ ;
- на шаге 2 измеряют уровень сигнала  $U_{\text{ДНМП}}(t)$  с датчика напряженности магнитного поля, пропорционального напряженности меняющегося во времени внешнего магнитного поля, создаваемого ОК в рабочем режиме (рис. 3, а).

Получение информации о ТС ОК осуществляется путем анализа характера изменений кинетики (формы) выходного сигнала с датчика напряженности магнитного поля, так как она взаимосвязана с кинетикой тока, потребляемого ОК;

- на шаге 3 с использованием операции дифференцирования измеренный сигнал сдвигают по фазе на  $\Delta\varphi = \pi/2$ , получают сигнал  $U_{\text{ДЭ}}(t)$  (рис. 3, б). В качестве преобразующей функции, осуществляющей получение сдвинутого по фазе сигнала  $U_{\text{ДЭ}}(t)$  из измеренного сигнала  $U_{\text{ДНМП}}(t)$ , можно использовать любую функцию, которую нетрудно реализовать техническими или программными средствами (дифференцирование, смещение во времени и т. д.). С физической точки зрения сигнал  $U_{\text{ДЭ}}(t)$  обладает рядом достоинств, важнейшее из которых состоит в том, что производная от измеренного сигнала учитывает характерные аномалии в точках перегиба измеренного сигнала;
- на шаге 4 генерируют совокупность  $N$  стробирующих импульсов через интервалы времени  $\Delta t = T/N$ , где  $T$  — период измеренного сиг-

нала,  $N \geq 2$ , число измерений в интервале  $T$ . Число измерений в интервале  $T$  должно удовлетворять условиям теоремы Котельникова  $F_{\text{дискр}} \geq 2F_{\text{наив. гарм}}$ , т. е. частота дискретизации ( $F_{\text{дискр}}$ ) должна быть в два раза больше частоты наивысшей гармоники ( $F_{\text{наив. гарм}}$ ), содержащейся в спектре измеренного сигнала;

- на шаге 5 измеряют мгновенные значения сигналов с выхода датчика напряженности магнитного поля  $U_{\text{ДНМП}}$  (рис. 3, а) и сигнала  $U_{\text{ДЭ}}$  (рис. 3, б),

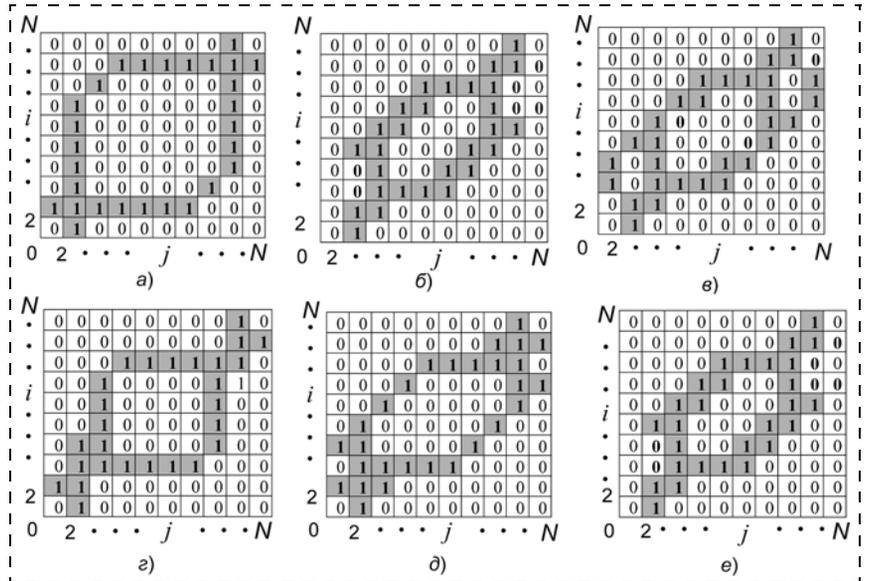


Рис. 2. Библиотека возможных технических ситуаций в контролируемом объекте и исследуемая матрица его технического состояния: а — исправное техническое состояние ОК; б — неисправность сглаживающего фильтра; в — неисправность состояния изоляции ЭО, наличие токов утечки; г — неисправность регулирующего элемента; д — неисправность обмоток трансформатора

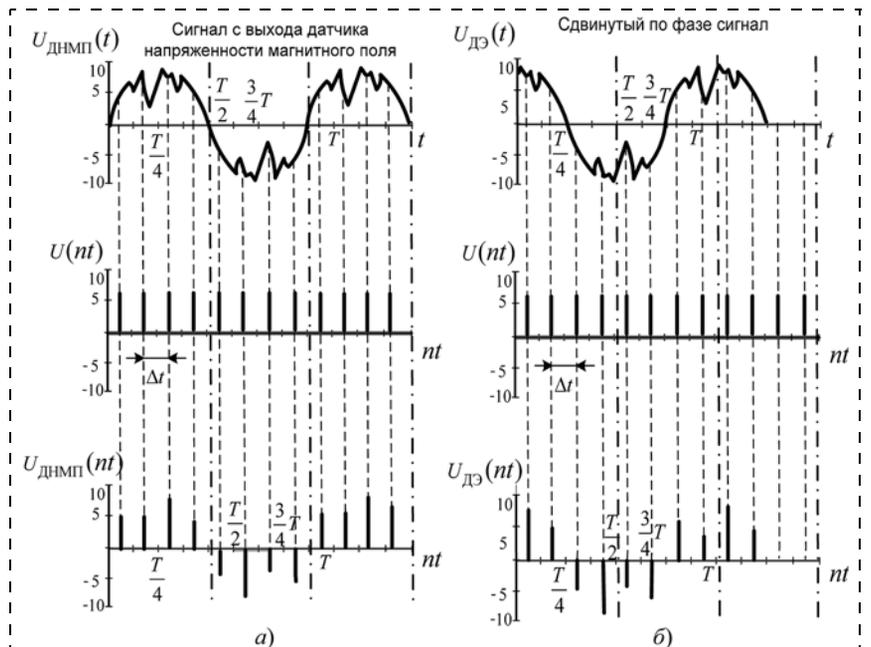


Рис. 3. Диаграммы процесса измерения мгновенных значений: а — сигнала с выхода датчика напряженности магнитного поля  $U_{\text{ДНМП}}$ ; б — сигнала  $U_{\text{ДЭ}}$ , сдвинутого по фазе на  $\Delta\varphi$

сдвинутого по фазе на  $\Delta\varphi$ , через интервалы времени  $\Delta t = T/N$ ;

- на шаге 6 оцифровывают измеренные мгновенные значения сигналов  $U_{\text{ДНМП}}(nt)$  и  $U_{\text{ДЭ}}(nt)$ , где  $n = 1, 2, \dots, N$  — число измерений в интервале  $T$ ;
- на шаге 7 запоминают полученные векторы цифровой последовательности длиной  $N$ , из которых формируют МТС  $g$  размерности  $N \times N$  (см. рис. 2, е) путем наложения векторов цифровой последовательности сдвинутого по фазе сигнала на векторы цифровой последовательности измеренного сигнала, причем можно проследить взаимосвязь информативных изменений в цифровых последовательностях полученной матрицы с видом технической ситуации в ОК.
- ♦ Вторым этапом алгоритма является этап идентификации (см. рис. 1, б):
- на шагах 12–14 поэлементно (после выбора элемента МТС  $g$  (шаг 8) и соответствующих элементов эталонных МТС  $g_M$  (шаги 9–11) происходит сравнение исследуемой МТС с эталонными МТС. При этом под сравнением понимается операция сложения по модулю два информативных содержаний сравниваемых элементов матриц;
- на шагах 15–17 при совпадении значений в элементах сравниваемых матриц происходит суммирование числа совпадений;
- на шагах 18–21 осуществляется сравнение элементов матриц снизу вверх и слева направо;
- на шаге 22 выводится число совпадений после того, как будет оценен последний элемент сравниваемых матриц,  $i = N, j = N$  (шаг 19, 21);
- на шаге 23 определяется матрица по наибольшему числу совпадений исследуемой матрицы  $g$  с одной из эталонных матриц  $g_m$ ;
- на шаге 24 идентифицируют ТС и место отказа в ОК по результатам анализа числа совпадений исследуемой и эталонной матриц (шаг 23).

Благодаря новой совокупности существенных признаков метода контроля и диагностики технических средств и введенной последовательности действий, основанной на применении двухэтапной процедуры контроля, обеспечивается повышение быстродействия и достоверности идентификации ТС ОК.

### Устройство контроля и диагностики технических средств

Предлагаемое устройство основано на аналогичных устройствах контроля [6–8], его структурная схема приведена на рис. 4 и включает в себя: источник переменного тока 1 (ИПТ); датчик напряженности магнитного поля 2 (ДНМП); объект контроля 3 (ОК); блок обработки сигнала 4 (БОС); блок идентификации технического состояния и места отказа в ОК 5 (БИТС); несколько витков электрического провода, питающего ОК 6.

Выходы ИПТ подключены к первому входу ОК и входу ДНМП, первый и второй выходы которого соединены, соответственно, со вторым входом ОК

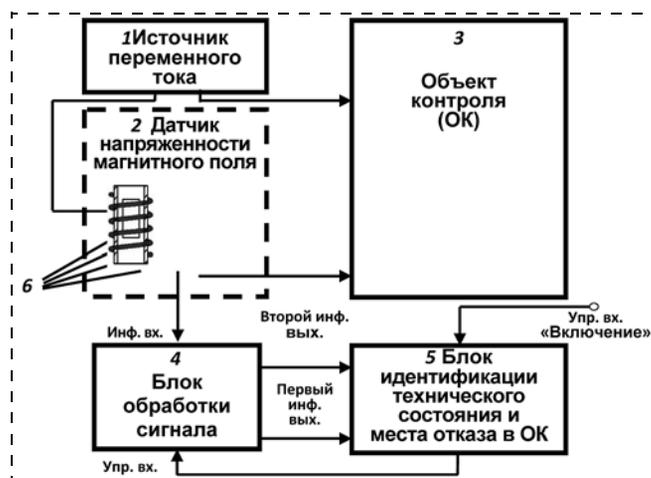


Рис. 4. Структурная схема устройства, реализующего кинетический метод контроля и диагностики технических средств



Рис. 5. Функциональная схема блока обработки сигнала

и информационным входом БОС. Первый и второй информационные выходы, а также управляющий вход БОС подключены к соответствующим информационным входам и управляющему выходу БИТС, управляющий вход "Включение" которого является управляющим входом устройства. ИПТ 1 предназначен для электропитания ОК переменным током.

ДНМП 2 [5] предназначен для измерения индуктивным способом уровня сигнала, пропорционального напряженности изменяющегося во времени внешнего магнитного поля, создаваемого ОК 3 в рабочем режиме. Он размещен в микроиндуктивном соленоиде — концентраторе из нескольких витков провода электропитания ОК, намотанного на диэлектрическую цилиндрическую трубку.

БОС 4 (рис. 5) предназначен для обработки и преобразования поступающего с ДНМП сигнала в векторы цифровых последовательностей, из которых формируют исследуемую МТС  $g$  и в дальнейшем запоминают в БИТС. БОС состоит из дифференцирующего элемента (ДЭ) 4.1, первого 4.2 и второго 4.3 электронных ключей (ЭК), первого 4.4 и второго 4.5 аналого-цифровых преобразователей (АЦП). При этом в БОС сигнал от ДНМП поступает на первый ЭК напрямую, а на второй ЭК — через ДЭ, управляющие входы которых объединены и являются управляющим входом БОС, а выходы соединены соответственно с входами первого и второго АЦП, выходы которых являются первым и вторым инфор-

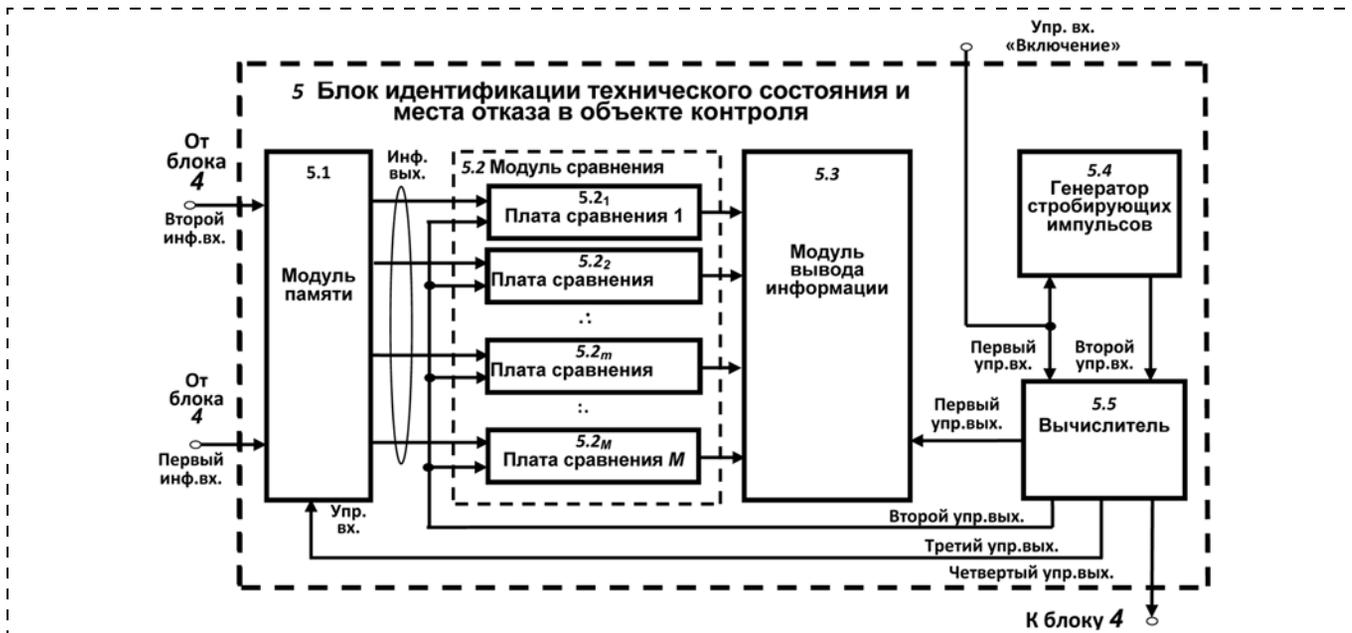


Рис. 6. Функциональная схема блока идентификации технического состояния и места отказа в объекте контроля

мационными выходами БОС. Дифференцирующий элемент 4.1 предназначен для преобразования сигнала  $U_{\text{ДНМП}}$ , поступающего с ДНМП, в сигнал  $U_{\text{ДЭ}}$ , сдвинутый по фазе на  $\Delta\varphi$ . Первый и второй ЭК предназначены для подключения сигнала, поступающего от ДНМП, и сигнала, сдвинутого по фазе на  $\Delta\varphi$ , к первому и второму АЦП соответственно. Первый и второй АЦП предназначены для преобразования в цифровой вид сигнала с ДНМП и сдвинутого по фазе сигнала.

БИТС 5, функциональная схема которого показана на рис. 6, предназначен для поэлементного сравнения исследуемой МТС  $g$  с эталонными МТС  $g_m$ , анализа числа совпадений сравниваемых матриц, идентификации ТС ОК по наибольшему числу совпадений элементов МТС с эталонной МТС, отображения идентифицированного ТС и места отказа в ОК на модуле вывода информации (МВИ). БИТС состоит из модуля памяти (МП) 5.1, модуля сравнения (МС) 5.2, МВИ 5.3, генератора стробирующих импульсов (ГСИ) 5.4 и вычислителя 5.5. При этом первый и второй информационные входы БИТС являются, соответственно, первым и вторым информационными входами МП. Его  $m$ -й информационный выход подключен к  $m$ -му информационному входу МС,  $m$ -й информационный выход которого подключен к  $m$ -му информационному входу МВИ, чей управляющий вход подключен к первому управляющему выходу вычислителя, а второй и третий управляющие выходы подключены к  $M$  управляющим входам МС и управляющему входу МП соответственно.

Заметим, что первый управляющий вход вычислителя подключен к управляющему входу ГСИ и является управляющим входом "Включение" БИТС, а выход ГСИ подключен ко второму управляющему входу вычислителя, четвертый информационный

выход которого является управляющим выходом БИТС. При этом МС состоит из  $M$  плат сравнения (ПС) 5.2 $_m$ . Управляющий, информационный вход и информационный выход  $m$ -й ПС являются соответствующими  $m$ -ми управляющим, информационным входами и информационным выходом МС. МП состоит из  $N \times N$  ячеек памяти, расположенных аналогично матрице, предназначен для хранения в двоичном коде информации, записанной в элементах МТС  $g$ . МС предназначен для сравнения исследуемой МТС  $g$  с эталонной МТС  $g_m$ . МВИ предназначен для отображения результатов идентификации ТС ОК. ГСИ предназначен для формирования управляющих импульсов в процессе выполнения этапов анализа и идентификации. Вычислитель предназначен для формирования управляющих воздействий на модули 5.1, 5.2, 5.3 БИТС и ключи 4.2 и 4.3 БОС, в рамках синхронизации работы устройства и управления этапами контроля. Каждая  $m$ -я ПС 5.2 $_m$  МС 5.2 БИТС предложенного устройства, представленная на рис. 7, состоит из элемента сравнения 5.2.1 $_m$ , буфера памяти (БП) эталонной МТС 5.2.2 $_m$ , регистра результата сравнения (РРС) 5.2.3 $_m$ . При этом в каждой  $m$ -й ПС первый и второй информационные входы  $m$ -го элемента сравнения соединены с информационным входом

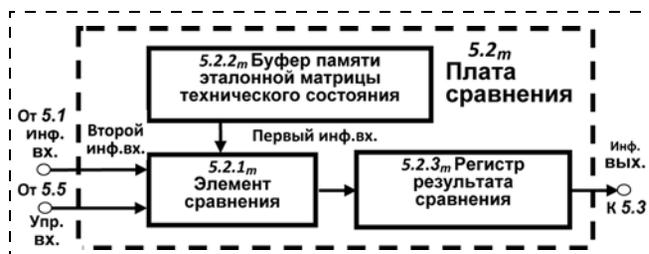


Рис. 7. Принципиальная схема платы сравнения

платы и выходом  $m$ -го БП эталонной МТС соответственно, его управляющий вход является управляющим входом ПС, а выход соединен со входом  $m$ -го РРС, выход которого является информационным выходом  $m$ -й ПС. Элементы сравнения предназначены для сравнения информации, записанной в элементах исследуемой МТС  $g$  и эталонной МТС  $g_m$ , поступающей на его первый и второй информационные входы. БП эталонной МТС  $g_m$  предназначен для хранения информации, записанной в ее элементах. РРС предназначен для записи двоичного кода, сформированного в результате сравнения информации, записанной в исследуемой и эталонной МТС.

Вычислитель 5.5 БИТС заявленного устройства, показанный на рис. 8, состоит из логического элемента (ЛЭ) "ИЛИ" 5.5.1; Т-триггера 5.5.2; первого 5.5.3, второго 5.5.4 и третьего 5.5.5 ЛЭ "И"; первого 5.5.6 и второго 5.5.8 электронных счетчиков (ЭС); перемножителя 5.5.7. При этом второй управляющий вход вычислителя соединен с первыми входами первого и третьего ЛЭ "И" напрямую и со вторым входом второго ЛЭ "И" через первый ЭС, выход которого также соединен со вторым входом ЛЭ "ИЛИ". Первым входом ЛЭ "ИЛИ" является первый управляющий вход вычислителя, а выход подключен к счетному входу Т-триггера, прямой выход которого поступает на второй вход первого, а инверсный выход — на первый вход второго и второй вход третьего ЛЭ "И". Выход третьего ЛЭ "И" соединен с обоими входами перемножителя, выход которого поступает на вход второго ЭС. Первый и второй выходы второго ЭС являются, соответственно, первым и вторым управляющими выходами вычислителя, а выходы первого и второго ЛЭ "И" являются, соответственно, его третьим и четвертым управляющими выходами. ЛЭ "ИЛИ" предназначен для выполнения операции логического сложения. Типовой Т-триггер со счетным входом предназначен для управления работой устройства. Первый,

второй и третий ЛЭ "И" предназначены для выполнения операции логического умножения. Первый и второй ЭС предназначены для отсчета стробирующих импульсов, а также выдачи управляющих воздействий на элементы вычислителя и модуль сравнения БИТС. Перемножитель предназначен для перемножения стробирующих импульсов, поступающих на его входы. Коэффициент перемножения равен числу  $T$ . С выхода перемножителя импульсы следуют с частотой  $N \times N/T$ . Входящие в предлагаемое устройство составные части и элементы (вычислитель, перемножитель, Т-триггер, ЭС, ЛЭ, МП, ПС, РРС, ЭС, БП эталонной МТС, МВИ, ГСИ) известны и описаны в работах [1, 2].

### Работа устройства контроля и диагностики технических средств

Работа предложенного устройства поясняется на примере схем (см. рис. 4—8). Перед началом работы Т-триггер, МП и РРС находятся в исходном обнуленном состоянии. В БП эталонных МТС записана библиотека возможных технических ситуаций в ОК в виде эталонных МТС, пример представлен на рис. 2,  $a-d$ . При подаче сигнала на управляющий вход "Включение" БИТС напряжение подается на вход ГСИ и через первый управляющий вход вычислителя — на первый вход ЛЭ "ИЛИ", с выхода которого на вход Т-триггера поступает сигнал, перебрасывая его в состояние логической "единицы". С прямого выхода Т-триггера положительный импульс подается на второй вход ЛЭ "И1".

Исследуемый сигнал с ДНМП, регистрирующего изменения напряженности внешнего магнитного поля, сопровождающего процесс токопотребления ОК, подается на информационные входы ключей 4.2 (непосредственно) и 4.3 (через ДЭ). Стробирующие импульсы, поступающие с ГСИ БИТС через открытый ЛЭ "И1" вычислителя на управляющие входы ЭК 4.2 и 4.3, обеспечивают отсчеты мгновенных значений исследуемого сигнала  $U_{\text{ДНМП}}$  (см. рис. 3,  $a$ ) и сигнала, сдвинутого по фазе,  $U_{\text{ДЭ}}$  (см. рис. 3,  $b$ ) через интервалы времени  $\Delta t = T/N$ . Результаты отсчетов подаются на входы АЦП 4.4 и 4.5 соответственно, и далее в преобразованном виде на соответствующие информационные входы МП 5.1.

МП 5.1 состоит из  $N \times N$  ячеек памяти, расположенных аналогично матрице ( $N$  строк и  $N$  столбцов). После каждого отсчета измеряемого сигнала результат в виде логической "единицы" записывается в  $(ab)$ -ю ячейку памяти, соответствующей  $a$ -му уровню сигнала на выходе АЦП 4.4 ( $a$ -я строка условной матрицы) и  $b$ -му уровню сигнала на выходе АЦП 4.5 ( $b$ -й столбец условной матрицы). На рис. 2,  $e$  представлена сформированная и сохраненная в МП МТС (логи-

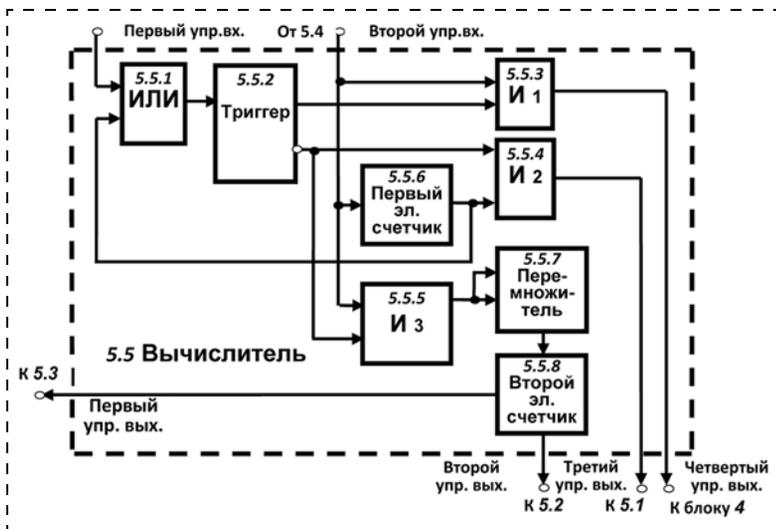


Рис. 8. Принципиальная схема вычислителя

ческим "единицам" соответствуют закрашенные элементы матрицы).

Строблирующие импульсы с выхода ГСИ 5.4 поступают также на вход первого ЭС 5.5.6. При подсчете  $N$ -го импульса сигнал с выхода ЭС подается через ЛЭ "ИЛИ" 5.5.1 на счетный вход  $T$ -триггера 5.5.2, перебрасывающий его в состояние логического "нуля", после чего ЭС обнуляется. Устройство переводится из режима анализа сигнала в режим идентификации результатов. При этом ЛЭ "И1" 5.5.3 закрывается, а напряжение положительной полярности с инверсного выхода  $T$ -триггера открывает ЛЭ "ИЗ" 5.5.5 для прохождения через него строблирующих импульсов с выхода ГСИ 5.4 на первый и второй входы перемножителя импульсов 5.5.7. Коэффициент перемножения равен числу  $T$ .

С выхода перемножителя 5.5.7 импульсы с частотой следования  $N \times N/T$  поступают на второй ЭС 5.5.8, выход которого подключен к управляющим входам ЭС 5.2.1<sub>1</sub>...5.2.1 <sub>$M$</sub> , первые информационные входы которых подключены к выходам БП эталонной МТС 5.2.2<sub>1</sub>...5.2.2 <sub>$M$</sub> , а вторые информационные входы соответственно подключены к информационным выходам МП 5.1.

Кодовые последовательности со второго управляющего выхода ЭС 5.5.8 обеспечивают последовательное сравнение информации, содержащейся в ячейках МП 5.1, с информацией, записанной в соответствующих ячейках БП эталонной МТС 5.2.2<sub>1</sub>...5.2.2 <sub>$M$</sub> . При наличии логических "единиц" в ячейке МП 5.1 и в аналогичной (с тем же номером строки и столбца МТС) ячейке памяти какого-либо БП эталонной МТС 5.2.2 <sub>$m$</sub>  ( $1 \leq m \leq M$ ) с выхода соответствующего ЭС 5.2.1 <sub>$m$</sub>  сигнал логической "единицы" поступит в соответствующий РРС 5.2.3 <sub>$m$</sub> . После сравнения последней ( $N \times N$ )-й ячейки МП 5.1 номер РРС 5.2.3 <sub>$m$</sub>  с максимальным числом логических "единиц" будет соответствовать номеру БП эталонной МТС 5.2.2 <sub>$m$</sub> , где записана информация эталонной МТС, в наибольшей степени соответствующая содержанию исследуемой МТС, записанной в МП 5.1.

Выходы РРС 5.2.3<sub>1</sub>...5.2.3 <sub>$M$</sub>  подключены к информационным входам МВИ 5.3. После поступления ( $N \times N$ )-го импульса с перемножителя 5.5.7 на вход ЭС 5.5.8 с его первого управляющего выхода подается разрешающий сигнал на управляющий вход МВИ 5.3, отображающего результат идентификации ТС ОК.

Так как ( $N \times N$ )-й импульс на выходе второго ЭС 5.5.8 соответствует  $N$ -му импульсу, подсчитанному первым ЭС 5.5.6 на втором этапе работы устройства, то с выхода ЭС 5.5.6 через ЛЭ "И2" 5.5.4, открытый напряжением

с инверсного выхода  $T$ -триггера, через третий управляющий выход вычислителя подается сигнал на управляющий вход МП для его "обнуления". Этот же сигнал с выхода первого ЭС 5.5.6 поступает через ЛЭ "ИЛИ" на счетный вход  $T$ -триггера, перебрасывая его в состояние логической "единицы". Устройство переключается в исходное положение и готово к работе в режиме анализа сигнала.

### Заключение

Для подтверждения возможности достижения указанного технического результата было проведено математическое моделирование, которое показало высокую эффективность от заявленного технического решения. Крайне незначительные изменения спектрального состава в области высоких гармоник (рис. 9, б и в) измеренных сигналов (рис. 9, а и б, соответственно) приводят к хорошо заметным изменениям в цифровых последовательностях формируемых МТС контролируемого объекта (рис. 9, д и е). Суммарная длительность работы устройства на двух этапах предложенного метода (анализа и идентификации) равна двум периодам исследуемого сигнала  $2T$ , что значительно быстрее, чем при контроле объекта с помощью представленных в работах [2—6] методов, когда время визуальной идентификации ТС ОК равно:  $T_{\text{виз. иден}} = T_{\text{отобр}} + T_1$ , где  $T_{\text{отобр}}$  — время отображения мнемонической диаграммы на электронном осциллографе, примерно равное  $T$ ;  $T_1$  — время, необходимое оператору на

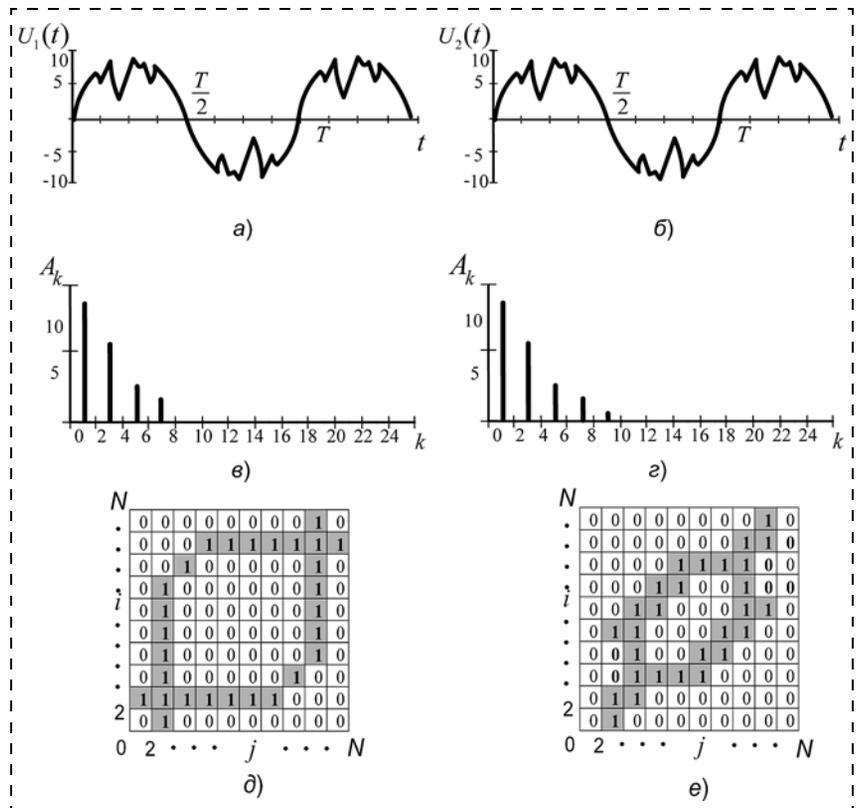


Рис. 9. Результаты имитационного и математического моделирования

визуальное восприятие и сравнение мнемонической диаграммы с набором эталонных диаграмм, причем  $T_1 \gg 2T$ . Таким образом, предложенный метод и устройство обладают существенным положительным эффектом, заключающимся в повышении быстродействия и достоверности идентификации ТС ОК и расширении области применения технических средств данного назначения.

#### Список литературы

1. Будко П. А., Литвинов А. И. Кинетический метод контроля и диагностики технических средств // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 7.
2. Ковальский В. Н. и др. Образный анализ вибрационного состояния подшипниковых опор скольжения применительно к экспресс-диагностике роторных машин // Тез. докл. 4-й Международной выставки и конференции "Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности". М.: Машиностроение, 2005. С. 246.
3. Жердев Н. К., Креденсер Б. П., Белоконов Р. Н. Контроль устройств на интегральных схемах. Киев: Техника, 1986. С. 87.
4. Сукиязов А. Г., Просьянников Б. Н. Способ экспресс-диагностики выпрямительных элементов блоков питания. А. с. СССР № 1718159, 1989 г.

5. Сукиязов А. Г., Вербов В. Ф., Золотарев В. Б., Просьянников Б. Н., Просьянников Г. Б. Способ визуального контроля параметров энергопотребления диагностики технического состояния электрооборудования переменного тока. Патент RU № 2378656. Оpubл. 10.01.2010, бюл. № 1. Заявка 2008105273 от 12.02.2008.

6. Сукиязов А. Г., Гутников В. Н., Просьянников Б. Н., Варков В. А. Устройство бесконтактного контроля состояния обмоток однофазных трансформаторов стержневого типа. А. с. СССР № 1760477, 1992 г.

7. Сукиязов А. Г., Просьянников Б. Н., Вербов М. В., Просьянников Г. Б. Устройство бесконтактного определения технического состояния тиристорных источников питания по патенту RU № 2185632, 2002 г.

8. Сукиязов А. Г., Вербов В. Ф., Просьянников Б. Н., Вербов А. В., Просьянников Г. Б. Устройство бесконтактного мониторинга полупроводниковых элементов однофазных и трехфазных мостовых выпрямителей. Патент на полезную модель № 66820 от 26.04.2007.

9. Просьянников Г. Б., Колесников А. Н., Вербов А. В. Устройство бесконтактного контроля технического состояния и режимов работы электроустановок. Патент на полезную модель № 68136 от 6.06.2007.

10. Шило В. Л. Популярныe микросхемы КМОП: Справ. М.: Горячая линия-Телеком, 2001. 112 с.

11. Микущин А. В., Сажнев А. М., Сединин В. И. Цифровые устройства и микропроцессоры. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 832 с.

**N. P. Budko**, Student, budko27@mail.ru, North-Caucasus Federal University,  
**P. A. Budko**, Professor, budko62@mail.ru, **A. I. Litvinov**, Postgraduate Student, litvinovaleks@mail.ru,  
**A. M. Vinogradenko**, Associated Professor, vino\_grad-82@mail.ru,  
 Military academy of communication of Marshal of the Soviet Union S. M. Budenny, St. Petersburg

## Realization of the Kinetic Control Method and Diagnostics of Technical Means

*The method of nondestructive control of the technical means, directed on increase of speed of control and reliability of identification of technical condition of object of control is offered. The offered kinetic control method and diagnostics of technical means is that form library of descriptions of possible technical situations in object of control and remember them in the form of reference matrixes of technical condition, at the exit of the sensor of intensity of a magnetic field measure signal level, shift the measured signal then, the signals measured and shifted on a phase will transform in a vector of digital sequence which remember in the form of a matrix of technical condition on a phase, carry out comparison of the received matrix with reference matrixes, and on the greatest number of coincidence of elements of compared matrixes identify technical condition and a refusal place in object of control. The device realizing the offered method, consists of a source of alternating current, the sensor of intensity of a magnetic field, object of control, the block of processing of a signal, the block of identification of technical condition and a refusal place. The offered method and the device realizing it treat area of control and measuring equipment and can be used at contactless control of parameters of technical means, their operating modes, and also for definition of a class of their technical condition.*

**Keywords:** technical tool, state chart, control, diagnostics, identification, technical condition, kinetics

#### References

1. Budko P. A., Litvinov A. I. Kineticheskiy metod kontrolya i diagnostiki tekhnicheskikh sredstv. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2014. N. 7.
2. Koval'skiy V. N. i dr. Obraznyy analiz vibratsionnogo sostoyaniya podshpnikovyykh opor skol'zheniya primenitel'no k ekspress-diagnostike rotornykh mashin. *Tez. dokl. 4-y Mezhdunar. vystavki i konferentsii "Nerazrushayushchiy kontrol" i tekhnicheskaya diagnostika v promyshlennosti*". М.: Mashinostroenie, 2005. P. 246.
3. Zherdev N. K., Kredentser B. P., Belokon' R. N. Kontrol' ustroystv na integral'nykh skhemakh. Киев: Tekhnika, 1986. P. 87.
4. Sukiyazov A. G., Prosyannikov B. N. Sposob ekspress-diagnostiki vypryamitel'nykh elementov blokov pitaniya. А. с. SSSR N. 1718159, 1989 g.
5. Sukiyazov A. G., Verbov V. F., Zolotarev V. B., Prosyannikov B. N., Prosyannikov G. B. Sposob vizual'nogo kontrolya parametrov energopotrebleniya diagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya peremennogo toka. Patent RU № 2378656. Opubl. 10.01.2010, byul. N. 1. Zayavka 2008105273 ot 12.02.2008.

6. Sukiyazov A. G., Gutnikov V. N., Prosyannikov B. N., Var'kov V. A. Ustroystvo beskontaktnogo kontrolya sostoyaniya obmotok odnofaznykh transformatorov sterzhnevoogo tipa. А. с. SSSR N. 1760477, 1992 g.

7. Sukiyazov A. G., Prosyannikov B. N., Verbov M. V., Prosyannikov G. B. Ustroystvo beskontaktnogo opredeleniya tekhnicheskogo sostoyaniya tiristorov istochnika pitaniya po patentu RU N. 2185632, 2002 g.

8. Sukiyazov A. G., Verbov V. F., Prosyannikov B. N., Verbov A. V., Prosyannikov G. B. Ustroystvo beskontaktnogo monitoringa poluprovodnikovyykh elementov odnofaznykh i trekhfaznykh mostovyykh vypryamiteley. Patent na poleznuyu model' N. 66820 ot 26.04.2007.

9. Prosyannikov G. B., Kolesnikov A. N., Verbov A. V. Ustroystvo beskontaktnogo kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya i rezhimov raboty elektroustanovok. Patent na poleznuyu model' N. 68136 ot 6.06.2007.

10. Shilo V. L. Populyarnye mikroskhemy КМОП: Справ. М.: Goryachaya liniya-Telekom, 2001. 112 p.

11. Mikushin A. V., Sazhnev A. M., Sedinin V. I. Tsifrovye ustroystva i mikroprotsessory. SPb.: BKhV-Peterburg, 2010. 832 p.

# ЖУРНАЛ В ЖУРНАЛЕ



## Управление и информатика в авиакосмических и морских системах



**Главный редактор:**  
ЛЕБЕДЕВ Г. Н.

**Ответственный секретарь:**  
БЕЗМЕНОВА М. Ю.

**Редакционная коллегия:**

АЛЕКСЕЕВ В. В.  
БАРАНОВ Л. А.  
БЕЛОКОНОВ И. В.  
БУКОВ В. Н.  
ВАСИЛЬЕВ В. И.  
ГОДУНОВ В. А.  
ГУРЕВИЧ О. С.  
ГУРСКИЙ Б. Г.  
ЕФИМОВ В. В.  
ЗАЙЦЕВ А. В.  
КРЫЖАНОВСКИЙ Г. А.  
НЕСТЕРОВ В. А.  
ОХТИЛЕВ М. Ю.  
ПАНКРАТОВ В. М.  
РАСПОПОВ В. Я.  
САБО Ю. И.  
СТЕПАНОВ О. А.  
СОЛДАТКИН В. М.  
ФИЛИМОНОВ Н. Б.  
ХИМЕНКО В. И.  
ЧЕБУРАХИН И. Ф.  
ШИРЯЕВ В. И.  
ШКОЛИН В. П.

**Редакция:**

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

## СОДЕРЖАНИЕ

- Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А., Щербатюк А. Ф.,  
Мурсалимов Э. Ш., Туфанов И. Е.**  
Новый метод контурного управления движением АНПА . . . . . 46
- Дорожко В. М.**  
Динамическая нагрузка аномальной вейвлет-волны на неподвижное препятствие . . . . . 56
- Загоруйко С. Н., Казьмин В. Н., Носков В. П.**  
Навигация БПЛА и 3D-реконструкция внешней среды по данным бортовой СТЗ . . . . . 62
- Жаринов И. О., Кирсанова Ю. А., Коновалов П. В., Костишин М. О.**  
Алгоритм формирования и вывода картографических изображений в системах навигации пилотируемых летательных аппаратов . . . . . 68

**В. Ф. Филаретов**<sup>1, 2</sup>, д-р техн. наук, проф., filaret@pma.ru,  
**Д. А. Юхимец**<sup>1, 2</sup>, канд. техн. наук, доц., undim@iacp.dvo.ru,  
**А. Ф. Щербатюк**<sup>3</sup>, д-р техн. наук, чл.-корр. РАН, зав. лаб., alex-scherba@yandex.ru,  
**Э. Ш. Мурсалимов**<sup>1, 2</sup>, инженер, murs@iacp.dvo.ru,  
**И. Е. Туфанов**<sup>1</sup>, аспирант, науч. сотр., ituphanov@gmail.com,  
<sup>1</sup> Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток  
<sup>2</sup> Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток  
<sup>3</sup> Институт проблем морских технологий ДВО РАН, г. Владивосток

## Новый метод контурного управления движением АНПА\*

*Предлагается новый метод синтеза системы контурного управления движением автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) по сложным пространственным траекториям. Метод основан на введении в систему управления (СУ) АНПА дополнительных контуров автоматического формирования таких программных сигналов, обработка которых этой СУ обеспечит движение АНПА по заданной пространственной траектории с высокой скоростью при сохранении заданной точности. Показаны особенности реализации предложенной СУ, а также приведены результаты экспериментальных исследований, которые подтверждают ее высокую эффективность.*

**Ключевые слова:** подводный аппарат, система управления, контурное управление, формирование программных сигналов, высокоскоростное движение

### Введение

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) являются эффективным средством для выполнения многих технологических операций в водной среде: поиска и подъема затонувших объектов, разведки полезных ископаемых, картографирования дна, экологического мониторинга, обследования протяженных объектов (сооружений) и многого другого.

Наиболее распространенным режимом работы известных АНПА является последовательный обход заданных целевых точек (waypoints). Этот режим является хорошо изученным, и для его реализации уже разработаны эффективные системы управления [1, 2].

Однако существует большое число действий (стыковочные операции, обход препятствий, движение вдоль дна и протяженных объектов), при выполнении которых необходимо обеспечивать движение АНПА (часто быстрое) по некоторым пространственным траекториям с высокой динамической точностью. В работах [3, 4] при описании методов планирования траекторий движения АНПА вдоль дна со сложным рельефом и подводных трубопроводов отмечается, что увеличить эффективность обзорных и других подводных технологических операций можно только при формировании гладких траекторий движения с использованием высококачественного контурного управления АНПА. Многие исследователи отмечают, что реализация точного контурного управления особо важна для АНПА с ограниченным числом степеней свободы.

\* Работа проводилась при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант № 14-19-00081).

Методы контурного управления АНПА можно разделить на две основные группы. В первую входят методы с параметризацией траектории движения во времени. При этом системы управления (СУ) АНПА должны как можно точнее обрабатывать программные сигналы движения в следящем режиме (trajectory tracking). В работах [5, 6] для реализации систем контурного управления АНПА используются нелинейные регуляторы, реализация которых в составе СУ АНПА вызывает затруднения из-за их большой вычислительной сложности и необходимости оценивания параметров АНПА в реальном масштабе времени. В работе [7] описывается система с переменной структурой, использующая скользящий режим, в которой сигналы управления должны вырабатываться с большой частотой. Это предъявляет особые требования к аппаратной части СУ АНПА.

Вторая группа методов обеспечивает синтез СУ, минимизирующих отклонения АНПА от заданных траекторий (path following). В частности, в работе [8] описывается СУ АНПА при его движении по заданной пространственной траектории при наличии подводных течений. В этой работе для компенсации влияния течений предлагается использовать алгоритм вычисления дополнительного угла курса, для вычисления которого предполагается использовать данные о векторе течения, что не всегда возможно. В работе [9] описывается метод управления движением АНПА с ограниченным числом степеней свободы по заданной траектории с помощью нелинейного регулятора, учитывающего как кинематику, так и динамику этого аппарата. Однако этот регулятор синтезируется на основе упрощенного описания динамики АНПА и имеет сложную для реализации структуру. В работе [10] описывается метод

синтеза СУ АНПА, построенный на основе инверсной динамики. Этот метод требует достаточно точного знания параметров математической модели АНПА, что на практике редко возможно.

Важно отметить, что при движении АНПА по пространственным траекториям некоторые из его движителей под влиянием внешних воздействий и перекрестных связей между всеми каналами управления могут выходить в насыщение, что сразу приводит к сходу АНПА с предписанной траектории. Этот эффект проявляется особенно сильно при движении АНПА с высокой скоростью и на пространственных траекториях с большой кривизной. В работах [11, 12] описаны методы борьбы с этим явлением, использующие дополнительные системы автоматического формирования программных сигналов, однако в этих работах описаны отдельные варианты таких систем, но не выработан обобщенный подход к их синтезу.

Таким образом, в настоящее время по-прежнему стоит проблема создания новых эффективных методов высококачественного контурного управления АНПА, имеющими различные конструктивные особенности.

### 1. Постановка задачи

В представленной работе ставится и решается задача создания обобщенного метода, позволяющего синтезировать легко реализуемые СУ, обеспечивающие высокоскоростные и высокоточные движения АНПА по сложным (произвольным) пространственным траекториям в условиях априорной неопределенности и переменности параметров этих аппаратов при наличии неизмеряемых внешних воздействий со стороны окружающей вязкой среды. Разрабатываемый метод предполагается строить на основе нового принципа управления, согласно которому основное внимание будет сосредоточено на управлении входным программным сигналом, а в каналах управления самим АНПА предполагается использовать простейшие стационарные регуляторы, обеспечивающие его устойчивость. При этом в следящих СУ АНПА входные (программные) сигналы каждого канала управления будут формироваться с использованием виртуальной пространственной траектории, которая не будет совпадать с предписанной траекторией реального движения АНПА.

Реализация синтезируемых систем контурного управления (СКУ) должна быть обеспечена с использованием типового бортового оборудования АНПА.

### 2. Описание системы траекторного управления АНПА

Как уже было отмечено ранее, в этой работе для построения эффективной СКУ АНПА будут использованы методы синтеза систем автоматического формирования программных сигналов их движения, описанные в работах [11, 12]. В этих работах предложено два различных метода синтеза

таких систем. Один обеспечивает автоматическую настройку значения программной скорости движения АНПА, а другой — непрерывное формирование траектории движения программной (целевой) точки. Далее рассмотрим эти методы и на их основе сформируем обобщенный подход к построению систем высокоточного и высокоскоростного контурного управления АНПА.

Методы построения СКУ, описанные в работах [11, 12], предполагают, что в АНПА уже содержится простая в реализации СУ, позволяющая лишь устойчиво обрабатывать программные сигналы, поступающие на ее входы. Эта СУ может иметь в своем составе типовые линейные регуляторы и описывается следующим выражением:

$$u(t) = F_u(X^*(t), X(t), \dot{X}^*(t), \dot{X}(t)), \quad (1)$$

где  $u \in R^m$  — вектор сигналов управления;  $X^* = \{x^*, y^*, z^*\}^T \in R^3$  — вектор программных сигналов движения АНПА, задающий его желаемое положение в абсолютной системе координат (АСК);  $X = \{x, y, z\}^T \in R^3$  — вектор положения АНПА в АСК;  $m$  — число входов АНПА;  $T$  — символ транспонирования.

Вектор  $X^*(t) \in R^3$  программного движения АНПА формируется на основе аналитического уравнения, задающего это движение в зависимости от программной скорости и последовательности точек в АСК, которые должен обойти АНПА:

$$X^*(t) = F_x(P^*, v^*, t), \quad (2)$$

где  $P^* = (P_1^*, P_2^*, \dots, P_N^*)$  — последовательность точек в АСК, которые должен обойти АНПА;  $v^*$  — программная скорость его движения по траектории.

СУ (1) позволяет обработать программное значение  $X^*(t)$  с некоторой динамической ошибкой

$$\varepsilon(t) = X^*(t) - X(t), \quad \varepsilon(t) \in R^3, \quad (3)$$

значение которой зависит от типа СУ, параметров АНПА и  $X^*(t)$ . Если АНПА движется по криволинейной траектории, то наличие вектора  $\varepsilon(t) \neq 0$  приводит к появлению вектора  $\varepsilon_n(t) \in R^3$  отклонения его от этой траектории (рис. 1). При этом между ве-

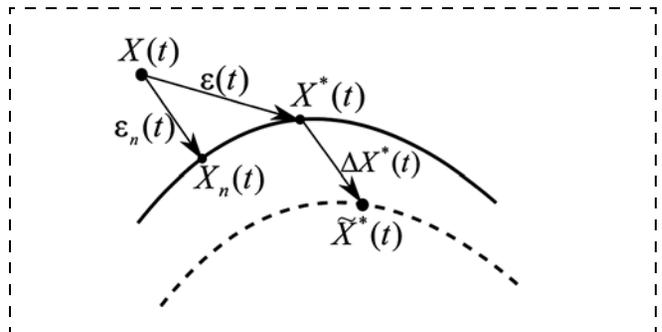


Рис. 1. Схема движения АНПА по пространственной траектории

личинами  $\varepsilon(t)$  и  $\varepsilon_n(t)$  существует следующее соотношение:

$$0 \leq \|\varepsilon_n(t)\| \leq \|\varepsilon(t)\|. \quad (4)$$

Таким образом, задачу контурного управления движением АНПА можно сформулировать с помощью неравенства

$$\|\varepsilon_n(t)\| \leq \varepsilon_n^*, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_n^*$  — величина допустимого отклонения АНПА от заданной траектории движения.

В работе [11] при решении задачи контурного управления АНПА совместно с СУ (1) предлагается использовать дополнительный контур автоматического формирования программной скорости его движения, позволяющий сформировать такое значение этой скорости, при котором используемая СУ обеспечивает выполнение условия (5). Структурная схема контура формирования программной скорости движения АНПА показана на рис. 2. Из этого рисунка видно, что указанный контур представляет собой систему автоматического управления, на вход которой поступает сигнал  $\varepsilon_n^*$ , а объектом управления (штриховой прямоугольник) является АНПА вместе с его СУ и системой формирования сигналов  $X^*(t)$ .

Для оценки точности движения АНПА по траектории используется сигнал вида

$$E(t) = k_v \varepsilon_m(t) + \|\varepsilon_n(t)\|, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_m(t) = \|X^*(t) - X(t)\|$ ,  $k_v$  — положительный коэффициент. Сигнал (6) используется в качестве сигнала  $v^*$  обратной связи в контуре формирования, значение которого формируется регулятором  $R_v(\xi)$ , где  $\xi(t) = \varepsilon_n^* - E(t)$  — ошибка регулирования.

Этот регулятор работает по следующему алгоритму. Если  $\xi(t) < 0$ , то справедливо неравенство  $E(t) > \varepsilon_n^*$ , и в этом случае регулятор  $R_v(\xi)$  будет уменьшать  $v^*(t)$ , одновременно уменьшая  $\|\varepsilon(t)\|$ . При этом согласно неравенству (4) и выражению (6) одновременно будут уменьшаться  $\|\varepsilon_n(t)\|$  и  $E(t)$ . Если  $\xi(t) > 0$ , то  $E(t) < \varepsilon_n^*$ . Тогда  $R_v(\xi)$  будет увеличивать  $v^*$ .

Переменная  $E(t)$  (6) имеет две составляющие:  $\|\varepsilon_n(t)\|$  и  $k_v \varepsilon_m$ . Первая отвечает за точность движе-

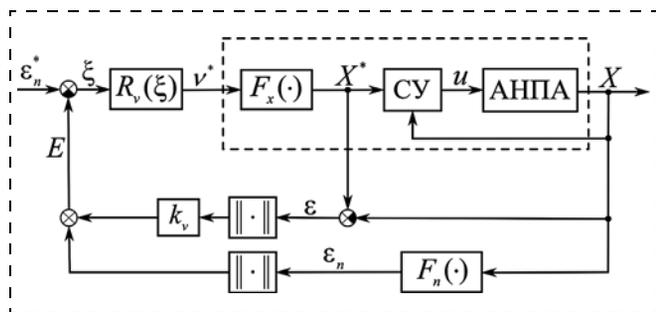


Рис. 2. Структурная схема формирования программной скорости движения АНПА

ния АНПА по участкам траектории с большой кривизной, когда величина  $\varepsilon_n(t)$  может быть большой. Вторая необходима при движении АНПА по участкам траектории с малой кривизной, где отклонение АНПА от программной траектории мало и не зависит от скорости его движения. В этом случае требуется ограничивать только величину  $\varepsilon(t)$ , чтобы предотвратить неоправданно большое увеличение  $v^*$  и, как следствие, возникновение больших отклонений от программной траектории при переходе АНПА с участков траектории с малой кривизной на участки с большой кривизной.

Таким образом, синтез контура формирования  $v^*$  сводится к синтезу регулятора  $R_v(\xi)$ . Метод синтеза этого регулятора подробно описан в работе [11].

Следует отметить, что рассмотренная схема позволяет обеспечивать качественное управление и при возможных ограничениях, накладываемых на управляющие сигналы в различных каналах управления АНПА. Однако недостатком этого способа управления является тот факт, что увеличение точности движения АНПА по заданной траектории происходит за счет уменьшения скорости его движения даже тогда, когда имеется значительный запас мощности двигателей АНПА.

Для обеспечения высокой точности работы АНПА будет использован новый принцип (метод) управления, подробно описанный в работе [12]. Согласно этому принципу программный сигнал, подаваемый на входы всех следящих СУ АНПА и определяющий его движение по предписанной траектории, формируется на выходе специально создаваемого контура построения программных сигналов движения АНПА. В этом контуре на основе непрерывно получаемой информации о текущем положении АНПА относительно указанной траектории и параметрах его движения непрерывно определяется текущее положение и траектория пространственного перемещения целевой точки, ориентируясь на которую, этот аппарат движется по предписанной траектории с желаемой динамической точностью. Иными словами, в отличие от традиционных следящих систем слежение АНПА происходит за целевой точкой, непрерывно перемещающейся не по предписанной (программной), а по некоторой виртуальной траектории. Следует отметить, что основной целью СУ, синтезируемой на основе нового принципа, является управление не самим АНПА (это обеспечивают типовые регуляторы, установленные в соответствующих следящих системах), а его входным сигналом, что, как оказалось, много проще в реализации и эффективнее с точки зрения обеспечения требуемого качества управления по сравнению с традиционными системами. При этом целью указанных простейших и легко реализуемых типовых регуляторов является обеспечение устойчивости соответствующих замкнутых контуров, а динамическая точность управления АНПА обеспечивается именно непрерывно формируемым программным сигналом, подаваемым на входы всех его следящих

систем. Отметим, что при использовании указанного нового принципа, ввиду применения простейших регуляторов в следящих контурах каждого канала управления АНПА, значения ошибок между входным программным сигналом конкретного контура, формируемым на основе текущего пространственного положения целевой точки, и его выходным сигналом могут быть большими, но при этом сам АНПА (это будет показано ниже по результатам проведенных морских испытаний) будет перемещаться с высокой точностью по предписанной ему программной траектории.

В работе [12] показано, что для выполнения условия (5) программную траекторию перемещения целевой точки  $\tilde{X}^*(t)$  необходимо формировать по закону

$$\tilde{X}^*(t) = X^*(t) + \Delta X^*(t); \quad (7)$$

$$\Delta X^* = k_\varepsilon(X_n - X) = k_\varepsilon \varepsilon_n,$$

где  $\Delta X^*(t) \in R^3$  — вектор дополнительного программного сигнала, смещающего программную точку  $X^*(t)$  с заданной траектории движения АНПА;  $k_\varepsilon$  — положительный коэффициент;  $X_n$  — ближайшая к текущему положению АНПА точка, расположенная на заданной траектории (см. рис. 1).

На рис. 3 показана структурная схема системы формирования вектора  $\tilde{X}^*(t)$ .

Из рис. 3 видно, что контур формирования вектора  $\tilde{X}^*(t)$  положения целевой точки представляет собой СУ, которая стремится обнулить разность  $X_n - X$ , т. е. привести текущее положение АНПА к точке  $X_n$ , лежащей на предписанной траектории, а сигнал  $\tilde{X}^*$  можно рассматривать как внешнее воздействие.

Динамическую точность работы системы, показанной на рис. 3, можно повышать, уменьшая разность  $X_n - X$ , при любой программной траектории и скорости движения АНПА, если увеличивать коэффициент  $k_\varepsilon$ , но с обязательным обеспечением требуемого запаса устойчивости системы. При этом необходимо иметь в виду, что значительное увеличение  $k_\varepsilon$  и скорости движения АНПА неизменно приводит к насыщению его движителей на участках траектории с большой кривизной. Учет ограничений мощности движителей АНПА при обработке программного сигнала можно обеспечить введением

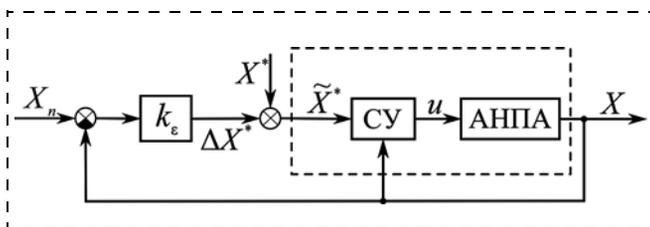


Рис. 3. Структурная схема СУ, использующей смещение точки  $\tilde{X}^*(t)$  с программной траектории движения АНПА на основе выражений (7)

ем в его СУ дополнительного контура автоматической настройки программной скорости движения АНПА [11], который обеспечит снижение этой скорости в случае, когда некоторые его движители не смогут обработать формируемые сигналы управления. При этом в процессе движения АНПА по программной траектории необходимо постоянно оценивать текущее значение  $\varepsilon_n(t)$  и сравнивать его с  $\varepsilon_n^*$ . Если неравенство (5) выполняется, то косвенно можно оценить, что у его движителей еще существует запас мощности, в пределах которого можно повышать скорость движения АНПА на конкретных участках программной траектории. Но увеличение этой скорости неизбежно приведет к увеличению отклонения АНПА от программной траектории, если она криволинейна. Иными словами, для максимально быстрого движения АНПА при неизменном выполнении условия (5) синтезируемая СУ АНПА должна одновременно формировать программные сигналы, соответствующие траектории движения целевой точки  $\tilde{X}^*(t)$ , и значение программной скорости движения этого АНПА, которая не должна позволить его движителям войти в насыщение.

Структурная схема этой обобщенной системы контурного управления АНПА показана на рис. 4. На этом рисунке введены следующие обозначения: БОТД — блок определения точности движения АНПА по предписанной траектории; СФПС — система формирования программных сигналов; РРД — регулятор режима (скорости) движения АНПА; СУ — типовые (простейшие) следящие системы управления соответствующими каналами АНПА, основной целью которых является обеспечение устойчивости управления.

Результаты выполненного математического моделирования показали, что использование синтезированной обобщенной системы (рис. 4) вместо прежней сложной иерархической адаптивной системы позволяет не только в 4...5 раз уменьшить отклонение АНПА от программной траектории, значительно повышая динамическую точность его управления, но при этом в 1,5 раза увеличить среднюю скорость этого движения даже при использовании простых линейных СУ, сохраняя при этом движение АНПА на пределе энергетических возможностей его движителей.

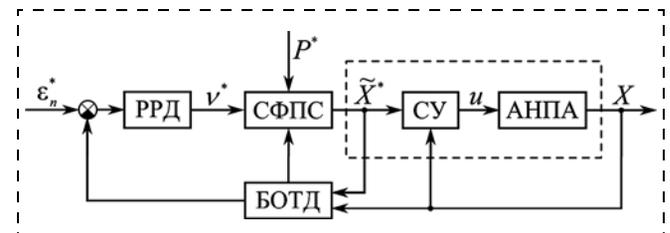


Рис. 4. Структурная схема системы управления положением и скоростью движения АНПА в пространстве

### 3. Особенности реализации системы контурного управления движением АНПА

В этом разделе рассматриваются особенности реализации синтезированной СКУ АНПА в составе бортовой системы программного управления.

**Особенности реализации системы и алгоритма формирования программной траектории и программных сигналов движения АНПА.** Указанный алгоритм реализует выражение (2). При этом траекторию движения АНПА удобно формировать на основе сплайнов Безье. Для этого необходимо задать координаты двух опорных точек, через которые должен пройти этот АНПА, и двух дополнительных управляющих точек, которые задают касательные к траектории в этих опорных точках [13]. Пример построения указанного сплайна показан на рис. 5.

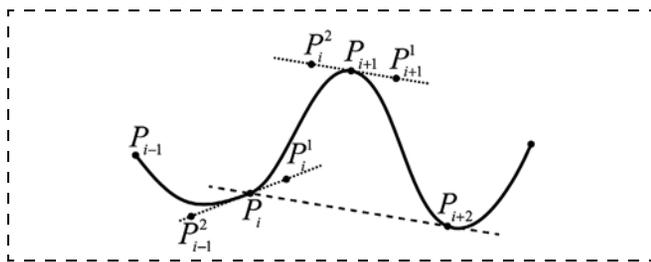


Рис. 5. Процесс формирования сплайнов по заданным точкам

Алгоритм определения положения точки  $X^*(t)$ , движущейся по заданной пространственной траектории, состоит из следующих этапов.

1. Расчет координат соответствующих точек сплайна:

$$\Delta P_i = \frac{P_i - P_{i-1}}{\|P_i - P_{i-1}\|}; \Delta P_{i+1} = \frac{P_{i+1} - P_i}{\|P_{i+1} - P_i\|};$$

$$\Delta P_i^C = k_{pi} \|P_i - P_{i-1}\| \frac{(k_{ci} \Delta P_i + (1 - k_{ci}) \Delta P_{i+1})}{\|(k_{ci} \Delta P_i + (1 - k_{ci}) \Delta P_{i+1})\|}, \quad (8)$$

$$P_i^1 = P_i + \Delta P_i^C; P_{i+1}^1 = P_{i+1} - \Delta P_{i+1}^C,$$

где  $P_i = (x_i, y_i, z_i)$  — координаты опорной точки, через которую должна пройти траектория движения АНПА;  $P_i^j, j = \overline{1, 2}$ , — координаты управляющих точек сплайна;  $k_{pi}, k_{ci}$  — коэффициенты, задающие расположение управляющих точек сплайна.

Следует отметить, что коэффициент  $0 \leq k_{ci} \leq 1$  задает наклон касательной к траектории в опорной точке (для большинства случаев можно выбирать  $k_{ci} = 0,5$ ), а коэффициент  $k_{pi} \geq 0$  влияет на кривизну полученной траектории (при  $k_{pi} = 0$  траектории прямолинейны).

2. Расчет текущего положения точки  $X^*(t)$  на заданной траектории.

Параметризация уравнения траектории движения АНПА, построенного на основе сплайна Безье,

происходит с использованием следующего выражения [13]:

$$X^*(\delta) = (1 - \delta)^3 P_i + 3\delta(1 - \delta)^2 P_i^1 + 3\delta^2(1 - \delta) P_i^2 + \delta^3 P_{i+1} = f_B(\delta), \quad (9)$$

где  $\delta \in [0, 1]$  — нормированное время движения точки  $X^*(t)$  по сплайну между точками  $P_i$  и  $P_{i+1}$ .

Скорость движения точки  $X^*(t)$  по траектории определяется скоростью изменения нормированного времени. Но так как расстояния между соседними базовыми точками траектории различны и заранее неизвестны, то получить соответствие между значением  $\delta$  нормированного и значением  $t$  реального времени в аналитическом виде сложно. Для обеспечения движения точки  $X^*(t)$  по сплайну с заданной скоростью был разработан и реализован следующий итерационный алгоритм:

- 1)  $i = 0: T^* = v^* \tau, X_i^* = X^*(t), \delta_i = \delta(k);$
- 2)  $i > 0: \delta_{i+1} = \delta_i + \Delta\delta, X_{i+1}^* = f_B(\delta_{i+1});$   
 $T_{i+1} = T_i + \|X_{i+1}^* - X_i^*\|, i = i + 1, \text{ если } T_{i+1} < T^*; \quad (10)$
- 3)  $X^*(t + \tau) = f_B\left(\delta_i + \frac{T^* - T_i}{T_{i+1} - T_i} \Delta\delta\right), \text{ если } T_{i+1} \geq T^*,$

где  $v^*$  — желаемая скорость движения АНПА по заданной траектории;  $T^*$  — путь, который проходит точка  $X^*(t)$  по траектории за период  $\tau$  дискретизации системы, двигаясь со скоростью  $v^*$ ;  $\Delta\delta$  — приращение нормированного времени на каждой итерации работы алгоритма;  $\delta(k)$  — значение нормированного времени, соответствующее предыдущему положению точки  $X^*(t)$ .

Исследования показали, что этот алгоритм (см. выражения (8)–(10)) позволяет за 2...3 итерации определить очередное положение точки  $X^*(t)$  на заданной траектории и обеспечить необходимую точность поддержания скорости ее движения в требуемых пределах.

**Особенности реализации локальных СУ АНПА.** Вычисленные непрерывно изменяющиеся координаты точки  $X^*(t)$  последовательно подаются на вход внутреннего контура управления АНПА (см. рис. 3), содержащего СУ (1), и в конечном итоге формируют управляющие воздействия, подаваемые в каналы управления каждого его движителя. При этом следует учитывать, что желаемое движение АНПА и координаты целевой точки  $\tilde{X}^*$  задаются в АСК, а упоры и моменты формируются движительным комплексом в связанной с АНПА системе координат (ССК). Поэтому при определении сигналов управления всеми движителями АНПА используются соответствующие преобразования.

Если АНПА имеет ограниченное число степеней свободы, то для движения к точке  $\tilde{X}^*$  его необходимо постоянно ориентировать по направлению к этой точке. Поэтому в качестве задающих сигналов

для контура управления АНПА следует использовать проекцию  $E_{LX}$  вектора ошибки его положения на ось  $\hat{x}$  ССК и желаемые приращения углов его курса  $\Delta\psi^*$  и дифферента  $\Delta\theta^*$ . Пример формирования этих задающих сигналов для движения АНПА в горизонтальной плоскости показан на рис. 6.

Указанные величины можно вычислить по следующим формулам:

$$E_L = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & \sin\psi\cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ \cos\psi\sin\theta & \sin\psi\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} (\tilde{X}^* - X);$$

$$E_M = \|E_L\|;$$

$$\Delta\theta^* = \arctg \frac{E_{LZ}}{E_M};$$

$$\Delta\psi^* = \arccos \left( \frac{E_{LX}\sin\psi + E_{LY}\cos\psi}{\sqrt{E_{LX}^2 + E_{LY}^2}} \right) \text{sign} E_{LY},$$
(11)

где  $E_L = (E_{LX}, E_{LY}, E_{LZ})$  — проекция вектора ошибки по положению АНПА на оси ССК;  $E_M$  — расстояние от АНПА до точки  $\tilde{X}^*$ ;  $\psi, \theta$  — текущие значения углов его курса и дифферента соответственно.

Обобщенная структурная схема СУ АНПА (см. рис. 4) показана на рис. 7. Эта СУ содержит три подсистемы (регулятора): регулятор продольного движения АНПА (РПД), регулятор угла курса (РУК) и регулятор угла дифферента (РУД). На входы этих подсистем поступают программные сигналы, рассчитанные с помощью выражений (12).

**Алгоритм расчета расстояния от АНПА до программной траектории его движения.** Из выражений (6) и (7) видно, что для реализации предлагаемой СКУ АНПА необходимо непрерывно определять координаты ближайшей к нему точки  $X_n(t)$ , расположенной на траектории  $X^*(t)$ . Для вычисления координат этой точки используется итерационный алгоритм, работа которого показана на рис. 8.

Этот алгоритм, имеющий малую вычислительную сложность, состоит из следующих шагов:

1) рассчитать расстояние  $r_1$  от АНПА до текущего положения точки  $X^*$ , находящейся на программной траектории;

2) уменьшить текущее нормированное время  $\delta_i$  на малую величину  $\Delta s > 0$  (от величины  $\Delta s$  зависит точность определения точки  $X_n(t)$ );

3) по выражению (9) рассчитать координаты точки  $X_n^i$  на программной траектории, которые соответствуют времени  $\delta_{i+1} = \delta_i - \Delta s$ ;

4) рассчитать расстояние  $r_2$  от АНПА до точки  $X_n^{i+1}$ ;

5) если  $r_2 \leq r_1$ , то  $r_1 = r_2$  и перейти на шаг 2, иначе координаты точки  $X_n^{i+1}$  являются координатами искомой точки  $X_n$ .

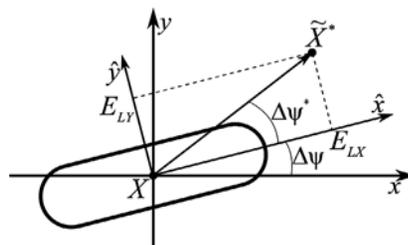


Рис. 6. Расчет задающих сигналов для регуляторов положения и ориентации АНПА

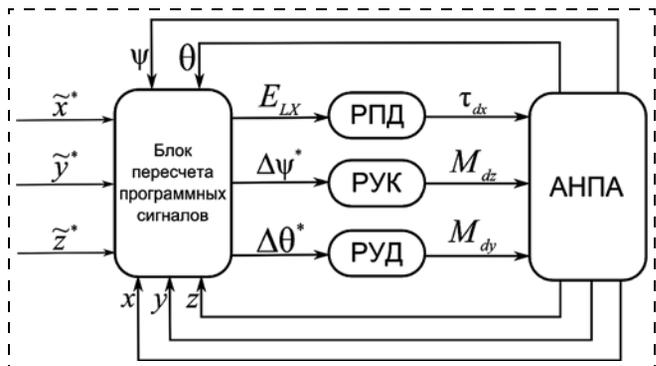


Рис. 7. Структурная схема СУ положением и ориентацией АНПА

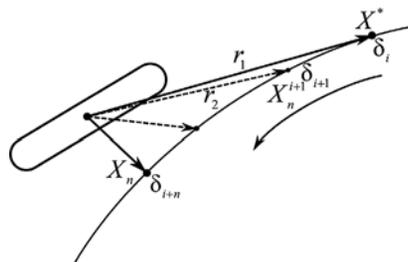


Рис. 8. Определение координат ближайшей к АНПА точки, лежащей на программной траектории его движения

После нахождения координат точки  $X_n$  с помощью выражения (7) рассчитываются координаты точки  $\tilde{X}^*$ , которые и подаются на вход СУ АНПА (см. рис. 7).

#### 4. Описание действующего образца АНПА МАРК и его СУ

Для проверки эффективности работы предложенной СКУ были проведены морские эксперименты с использованием АНПА МАРК, изображенного на рис. 9 (см. вторую сторону обложки), который был разработан в НОЦ "Подводная робототехника" ДВФУ и ИПМТ ДВО РАН в 2011 г. [14] и модернизирован в 2013 г.

В состав АНПА МАРК входят носитель и его информационно-измерительный комплекс (ИИК). Носитель включает корпус, движительно-рулевой комплекс (ДРК), систему энергообеспечения, систему программного управления и контроля, навигационный комплекс, комплекс средств связи и

комплекс средств его обнаружения. Основные характеристики АНПА МАРК приведены ниже.

Максимальная рабочая глубина погружения, м . . .	200
Масса, кг . . . . .	50
Длина, мм . . . . .	1800
Диаметр корпуса, мм . . . . .	230
Максимальная скорость, м/с . . . . .	3
Автономность (при скорости хода 1 м/с), ч . . . .	18

В базовый состав ИИК входят гидролокатор бокового обзора (ГБО), датчики температуры, давления и электропроводности воды. Опционально в него могут быть включены цифровая цветная фотосистема высокого разрешения с импульсным источником освещения, автономный магнитометр, донный профилограф, датчик растворенного метана, а также флюорометр с опцией измерителя мутности и др.

Конструкция АНПА включает водозаполняемые носовой и кормовой отсеки и герметичный центральный отсек, в котором размещена бортовая СУ. В носовой части АНПА установлены системы радиосвязи, GPS, датчики солености, температуры, давления и доплеровский лаг, а в кормовой части — джигительно-рулевой комплекс.

Основу бортовой СУ АНПА составляет локальная вычислительная сеть с программным обеспечением, которая включает РС-совместимый промышленный компьютер и набор микроконтроллеров. Компьютер является базовым для автопилота. Он обеспечивает выполнение программы-задания и работу ИИК. Микроконтроллеры предназначены для управления работой отдельных устройств и систем АНПА, а также для обеспечения их связи с автопилотом и предобработки данных.

Структурная схема бортовой СУ, изображенная на рис. 10, состоит из постоянной и переменной частей [15, 16]. Постоянная часть включает про-

грамму "менеджер миссии", программу управления движением, навигационную программу, бортовой архиватор данных и программу диагностики АНПА. Переменная часть представляет собой программу-задание (миссию) для текущего запуска. Для управления устройствами АНПА используется набор управляющих программ — драйверов, которые осуществляют связь с соответствующими устройствами посредством последовательного протокола через RS- или USB-порты.

Для передачи сообщений между параллельно работающими процессами, реализующими указанные выше программные модули, и для связи АНПА с постом оператора используется механизм IPC. С его помощью осуществляется обмен по принципу "публикатор-подписчик". Для управления миссией служит специальный процесс — "менеджер миссии". Он получает команды от судового поста управления о загрузке новой миссии и готовит ее к выполнению. На него также возложены функции приостановки или восстановления миссии, отмены текущего задания, полной отмены или смены миссии. На борту АНПА может присутствовать набор уже подготовленных миссий и менеджеру может поступить команда о начале выполнения одной из них. Если на борту нет требуемой миссии, то осуществляется загрузка по каналу связи ее исходного кода. После этого менеджер компилирует и запускает эту миссию.

Миссия представляет собой программу, содержащую вызовы специальных функций — команд управления аппаратом, которые делятся на три класса: команды управления движением, команды управления бортовыми устройствами, команды запроса данных. Команда запроса данных служит для получения информации о положении аппарата, его ориентации и т. п. В ответ на нее выполняется "публикация пакета" с требуемыми данными. Команда управления бортовым устройством "публикует пакет" с указанием соответствующему драйверу выполнить требуемые действия.

СУ АНПА, синтезированная выше на основе предложенного нового принципа, реализована в блоке "программа управления движением" (рис. 10). При этом данные о текущем положении и ориентации АНПА, необходимые для ее функционирования, поступают из навигационной системы АНПА, а набор базовых точек, на основе которых строится траектория движения АНПА, поступает из программы задания.

Следует отметить, что в АНПА МАРК используется синхронная гидроакустическая навигационная система с синтезированной длинной базой (ГАНС СДБ), использующая в качестве единственного навигационного маяка мобильную гидроакустическую

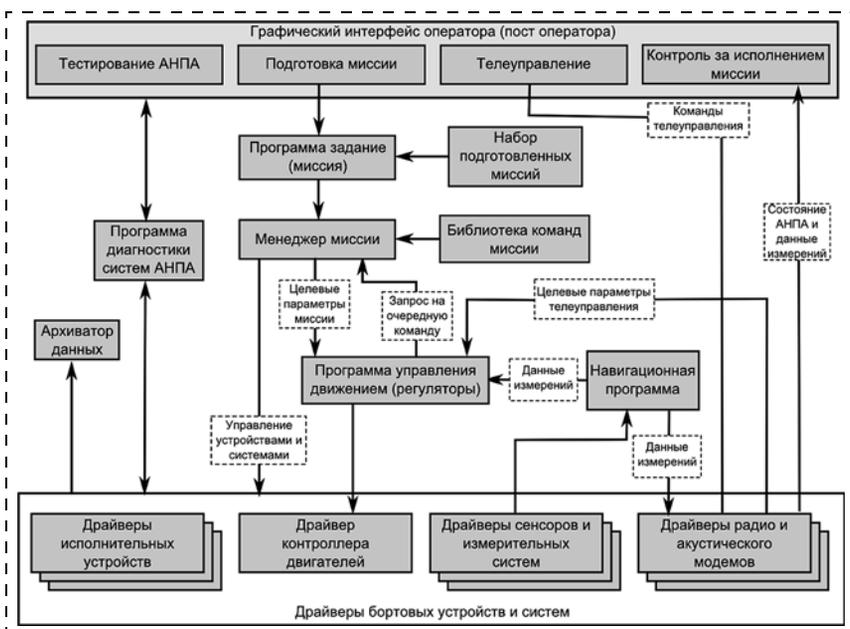


Рис. 10. Структурная схема бортовой СУ АНПА МАРК

антенну, буксируемую обеспечивающим судном (ОС) или автономным необитаемым водным аппаратом [17]. Работа этой системы основана на использовании модемной акустической связи, которая позволяет синхронно обмениваться пакетами навигационных данных между АНПА и ОС и одновременно измерять время распространения акустического сигнала между ними. В процессе выполнения миссии АНПА и ОС поочередно обмениваются навигационными данными, на основе которых АНПА определяет свое местоположение, а ОС отслеживает траекторию движения АНПА.

Навигационная программа рассчитывает координаты АНПА, используя данные, получаемые от нескольких устройств: GPS (на поверхности), инерциального измерительного модуля, доплеровского лага и гидроакустической навигационной системы. Структура комплексированной навигационной системы представлена на рис. 11 (вторую сторону обложки).

### 5. Некоторые результаты морских экспериментальных исследований

Морские испытания работы рассмотренной СУ АНПА были выполнены в августе—сентябре 2013 г. в заливе Петра Великого Японского моря. В процессе проведения морских экспериментов исследовали движение АНПА МАРК по гладкой программной траектории в различных режимах работы его СУ (см. рис. 4). Параметры этой СУ имели следующие значения:

1) контур управления положением (см. рис. 7): регулятор продольного движения  $\tau_{dx} = 100E_{LX} + 200\dot{E}_{LX}$ ; регулятор угла курса  $M_{dz} = 90\Delta\psi^* + 200\Delta\dot{\psi}^*$ ; регулятор угла дифферента  $M_{dy} = 40\Delta\theta^* + 100\Delta\dot{\theta}^* + 0,5[\Delta\theta^*]dt$ ;

2) контур формирования положения точки  $\tilde{X}^*(t)$  в АСК (см. рис. 3):  $k_\varepsilon = 2$ ,  $\Delta s = 0,01$ ;

3) контур формирования  $v^*$  (см. рис. 2):  $\varepsilon_n^* = 0,6$  м,  $k_v = 0,12$ ,  $R_v(s) = (k_i + k_{ps})/s$ ,  $k_p = 4$ ,  $k_i = 2$ .

Траектория движения АНПА в рассматриваемых экспериментах определялась уравнениями (8) с параметрами  $k_{pi} = 0,3$ ,  $k_{ci} = 0,5$  и проходила через точки  $(0, 0, 0) \rightarrow (0, 20, 0) \rightarrow (20, 20, 0) \rightarrow (20, 0, 0) \rightarrow (0, 0, 0)$ .

На рис. 12 показано движение АНПА по заданной программной траектории (серая линия) с постоянной скоростью 1 м/с. При этом на рис. 12, а показано реальное движение АНПА по этой траектории с использованием только типовой СУ (сплошная черная линия), а на рис. 12, б — его движение с использованием СУ, включающей синтезированный с помощью выражений (7) дополни-

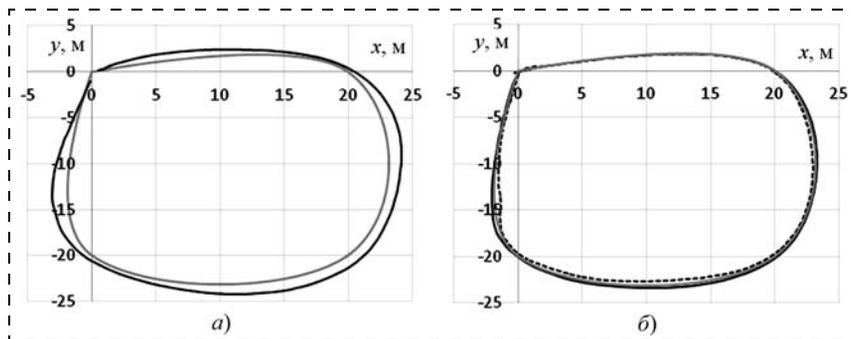


Рис. 12. Траектория движения АНПА без использования (а) и с использованием (б) дополнительного контура формирования положения точки  $\tilde{X}^*$

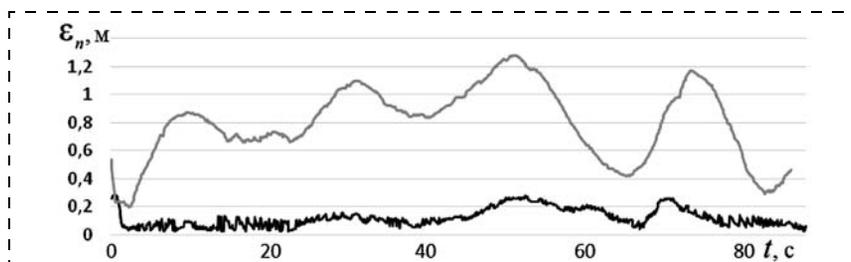


Рис. 13. Процесс изменения  $\varepsilon_n(t)$  без использования и с использованием в СУ АНПА дополнительного контура формирования точки  $\tilde{X}^*$

тельный контур формирования положения точки  $\tilde{X}^*$  (штриховая черная линия).

На рис. 13 показан процесс изменения отклонения АНПА от программной траектории при его движении с использованием типовой СУ (серая линия) и СУ, содержащей контур формирования положения точки  $\tilde{X}^*$  (черная линия).

Из рис. 13 видно, что использование в СУ АНПА синтезированного контура непрерывного формирования положения точки  $\tilde{X}^*$  позволяет увеличить точность его движения по указанной программной траектории более чем в 4 раза (с 1,3 до 0,28 м). При этом максимальное отклонение АНПА от заданной траектории в 2 раза меньше допустимого значения  $\varepsilon_n^* = 0,6$  м, что указывает на возможность повышения скорости его движения.

Отметим, что значения управляющих сигналов, вырабатываемых СУ АНПА по каждому каналу управления, имели ограничения, соответствующие максимальным по модулю значениям упоров (моментов), вырабатываемых его двигателями.

На рис. 14 и 15 показаны результаты экспериментальных исследований движений АНПА по гладким траекториям с заданной динамической точностью при использовании СУ, содержащей все синтезированные контуры управления (см. рис. 4). Черная линия на рис. 14 соответствует реальной траектории движения АНПА, серая — программной траектории, а штриховая — виртуальной траектории движения точки  $\tilde{X}^*$ , определяемой по выражениям (7). На рис. 15 показаны процессы изменения программной скорости движения АНПА (черная линия), его реальной скорости (штриховая

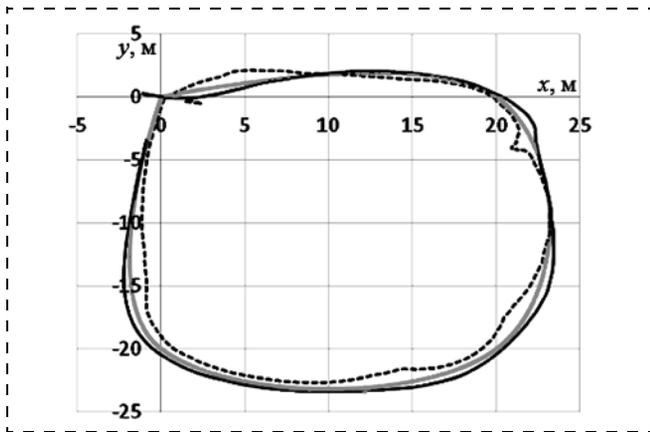


Рис. 14. Траектория движения АНПА при автоматической настройке его скорости

линия) и его отклонения от программной траектории (серая линия).

Из этих рисунков видно, что программная скорость движения АНПА при перемещении по сложной программной траектории меняется в широких пределах от 1,5 до 0,2 м/с, уменьшаясь на ее участках с большой кривизной, когда увеличивается отклонение АНПА от программной траектории, и увеличиваясь в противном случае на участках с малой кривизной. Но указанное отклонение никогда не превышает  $\varepsilon_n^* = 0,6$  м. Кроме того, из рис. 16 видно, что реальная скорость движения АНПА меняется с некоторым динамическим запаздыванием по отношению к программной скорости. Это объясняется как инерционностью АНПА, так и тем фактом, что программная скорость в данном случае задает не скорость движения самого АНПА, а скорость движения целевой точки  $\tilde{X}^*$ . При этом снижение указанной программной скорости приводит к уменьшению расстояния между АНПА и этой точкой, но

в процессе приближения АНПА к точке  $\tilde{X}^*$  его реальная скорость будет снижаться медленнее, чем программная скорость.

На рис. 16 показаны процессы изменения формируемых с помощью СУ АНПА сигналов по каналу продольного движения (рис. 16, а) и каналу курса (рис. 16, б) при его движении по рассматриваемой гладкой траектории.

Из рис. 16 видно, что при движении АНПА по участкам траектории с малой кривизной формируются наибольшие значения управляющих сигналов по продольному каналу движения, увеличивая скорость движения этого АНПА. И, наоборот, при прохождении АНПА участков с большей кривизной эти сигналы уменьшаются.

Исследования показали, что при использовании всех синтезированных контуров в СУ АНПА время прохождения рассмотренной траектории составило 78 с, а время прохождения этой же траектории с постоянной скоростью 1 м/с — 85 с. Относительно небольшое снижение времени прохождения заданной траектории объясняется отсутствием на этой траектории длинных участков с малой кривизной, на которых возможно движение АНПА с более высокой скоростью. Кроме того, следует отметить, что при использовании СУ с контуром автоматической настройки программной скорости движения АНПА наблюдается некоторое увеличение максимального отклонения АНПА от программной траектории по сравнению с использованием СУ, имеющей только контур формирования точки  $\tilde{X}^*$ , но при этом значение отклонения неизменно соответствовало условию (5) на всех участках траектории. Иными словами, введение контура автоматического формирования программной скорости позволяет более полно использовать возможности АНПА и качественные показатели его движения.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований показали, что предложенный принцип управления и разработанные на его основе методы синтеза соответствующих контуров позволяют спроектировать достаточно просто реализуемую, но при этом высококачественную СУ, способную обеспечить для АНПА высокую динамическую точность на предельно высоких скоростях его движения даже при наличии простейших типовых линейных регуляторов в следящих системах соответствующих каналов управления движительным комплексом.

### Заключение

В работе предложен новый подход к обеспечению высококачественного контурного управления скоростным движением АНПА, заключающийся

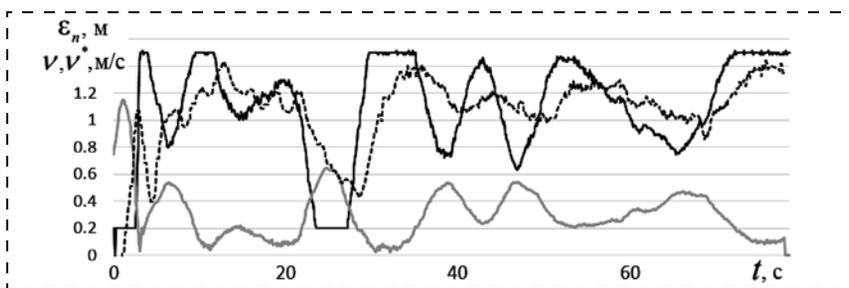


Рис. 15. Процессы изменения программной и реальной скоростей движения АНПА, а также его отклонения от заданной траектории

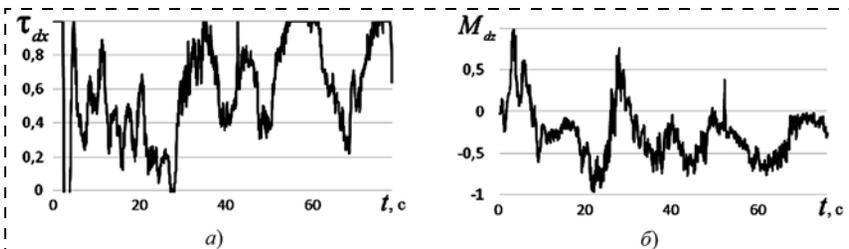


Рис. 16. Процесс изменения управляющих сигналов АНПА по каналу продольного движения (а) и по каналу управления углом курса (б)

во введении в его СУ дополнительных контуров для автоматического формирования программных сигналов движения: контура формирования положения целевой точки и контура формирования программной скорости движения. Эти контуры, построенные на основе нового принципа управления, позволяют автоматически формировать такие программные сигналы, которые обеспечивают движение АНПА по произвольным пространственным траекториям с максимально возможной скоростью, с учетом энергетических возможностей их движителей. При этом сохраняется заданная динамическая точность этого движения при использовании линейной бортовой СУ. В работе описаны особенности практической реализации синтезированной системы, которая обеспечивает высокую точность управления при наличии ограничений на упоры движителей АНПА. Результаты морских испытаний показали, что предложенная СУ обеспечивает повышение скорости движения АНПА по заданной траектории при сохранении требуемой динамической точности управления.

#### Список литературы

1. Fossen T. I. Guidance and control of oceanic vehicles. Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 1994. 494 p.
2. Antonelli G. Underwater Robots. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. 261 p.
3. Murthy K., Rock S. Spline-based Trajectory Planning Techniques for Benthic AUV Operations // Proc. of 2010 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles. Monterey, CA. 2010. P. 1–9.
4. Calvo O., Sousa A., Rozenfeld A., Acosta G. Smooth path planning for autonomous pipeline inspections // Proc. of 6-th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices. Djerba, Tunis. 2009. P. 1–9.
5. Rezazadegan F., Shojaei K. An Adaptive Control Scheme for 6-DOF Control of an AUV Using Saturation Functions // Proc. of 3-rd International Conference on Intelligent Computational Systems. Singapore. 2013. P. 67–72.

6. Lu W., He-ming Jia, Li-jun Zhang, Hong-bin Wang. Horizontal Tracking Control for AUV Based on Nonlinear Sliding Mode // Proc. of the IEEE International Conference on Information and Automation. Shenyang, China. 2012. P. 460–463.
7. Repoulas F., Papadopoulos E. Three Dimensional Trajectory Control of Underactuated AUVs // Proc. of the European Control Conference. Kos, Greece. 2007. P. 3492–3499.
8. Kim K., Ura T. 3-Dimensional Trajectory Tracking Control of an AUV "R-One Robot" Considering Current Interaction // Proc. of The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference. Kitakyushu, Japan, 2002. P. 277–283.
9. Xianbo X., Lionel Lapierre, Chao Liu, Bruno Jouvencel. Path tracking: combined path following and trajectory tracking for autonomous underwater vehicles // Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Francisco, USA, 2011. P. 3558–3563.
10. Subudhi B., Atta D. Design of a Path Following Controller for an Underactuated AUV // Archives of Control Sciences. 2009. V. 19 (LV), N. 3. P. 245–259.
11. Filaretov V. F., Yukhimets D. A. Synthesis of a System of Automatic Calculation of Program Signals for Controlling Motion of an Underwater Vehicle along a Complex Spatial Trajectory // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2010. V. 49, N. 1. P. 96–104.
12. Filaretov V. F., Yukhimets D. A. A Method for Forming Program Control for Velocity Regime of Motion of Underwater Vehicles along Arbitrary Spatial Trajectories with Given Dynamic Accuracy // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2011. V. 50, N. 4. P. 673–682.
13. De Boor C. A practical guide to splines (Revised edition). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2001. P. 366.
14. Ваулин Ю. В., Дубровин Ф. С., Кушнерик А. А., Туфанов И. Е., Щербатюк А. Ф. Малогабаритный автономный обитаемый подводный аппарат МАПК нового поколения для выполнения групповых операций // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 6. С. 59–65.
15. Denisenko M., Dubrovin F., Mun S., Nepostaev E., Suraev N., Tuphanov I., Vaulin Y. Control System of Small AUV for Multiple Vehicle Operation // Proc. of the International Conference and Exhibition "Underwater Intervention 2011". New Orleans, USA. 2011.
16. Tuphanov I., Scherbatyuk A. Development of Centralized Control System for AUV Group Operation // Proc. of the 18-th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology. Portsmouth, USA. 2013.
17. Scherbatyuk A. Ph., Dubrovin F. S. Some Algorithms of AUV Positioning Based on One Moving Beacon // Proc. of the IFAC Workshop Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles. FEUP, Porto, Portugal. 2012.

V. F. Filaretov<sup>1,2</sup>, Professor, filaret@pma.ru,  
 D. A. Yukhimets<sup>1,2</sup>, Associated Professor, undim@iacp.dvo.ru,  
 A. Ph. Scherbatyuk<sup>3</sup>, Head of Laboratory, alex-scherba@yandex.ru,  
 E. Sh. Mursalimov<sup>1,2</sup>, Engineer, murs@iacp.dvo.ru,  
 I. E. Tuphanov<sup>1</sup>, Post-graduate Student, Researcher, ituphanov@gmail.com

<sup>1</sup> Far Eastern Federal University

<sup>2</sup> Institute of Automation and Control Processes FEB RAS

<sup>3</sup> Institute of Marine Technology Problems FEB RAS

## The Method of Tracking Control of Autonomous Unmanned Underwater Vehicle Motion

*In this paper a new method of tracking control system of autonomous underwater vehicle (AUV) motion along the complex spatial trajectories is proposed. This method is based on using of additional loops of automatic formation of program signals in AUV control system (CS). First loop changes the desired trajectory of AUV movement so that with taking into account of dynamic error of its CS the AUV can movement along desired trajectory with desired accuracy. The second loop tunes the program AUV velocity (movement mode) along desired trajectory so that taking into account the restriction of thrusters power. As a result it becomes possible to provide the AUV movement along desired trajectory with maximal velocity and desired accuracy. The work of these additional loops provides the AUV movement along the desired spatial trajectory with high velocity without sacrificing of desired accuracy. The realization features of the proposed CS and results of experimental researches that confirm of its high efficiency are presented.*

**Keywords:** underwater vehicle, control system, tracking control, formation program signals, high-speed motion

## References

1. **Fossen T. I.** Guidance and control of oceanic vehicles. Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 1994. 494 p.
2. **Antonelly G.** Underwater Robots. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. 261 p.
3. **Murthy K., Rock S.** Spline-based Trajectory Planning Techniques for Benthic AUV Operations. *Proc. of 2010 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles*. Monterey, CA. 2010. P. 1–9.
4. **Calvo O., Sousa A., Rozenfeld A., Acosta G.** Smooth path planning for autonomous pipeline inspections. *Proc. of 6-th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*. Djerba, Tunis. 2009. P. 1–9.
5. **Rezadegan F., Shojaei K.** An Adaptive Control Scheme for 6-DOF Control of an AUV Using Saturation Functions. *Proc. of 3-rd International Conference on Intelligent Computational Systems*. Singapore. 2013. P. 67–72.
6. **Lu W., He-ming Jia, Li-jun Zhang, Hong-bin Wang.** Horizontal Tracking Control for AUV Based on Nonlinear Sliding Mode. *Proc. of the IEEE International Conference on Information and Automation*. Shenyang, China. 2012. P. 460–463.
7. **Repoulas F., Papadopoulos E.** Three Dimensional Trajectory Control of Underactuated AUVs. *Proc. of the European Control Conference*. Kos, Greece. 2007. P. 3492–3499.
8. **Kim K., Ura T.** 3-Dimensional Trajectory Tracking Control of an AUV "R-One Robot" Considering Current Interaction. *Proc. of The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference*. Kitakyushu, Japan, 2002. P. 277–283.
9. **Xianbo X., Lionel Lapierre, Chao Liu, Bruno Jouvencel.** Path tracking: combined path following and trajectory tracking for autonomous underwater vehicles. *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. San Francisco, USA, 2011. P. 3558–3563.
10. **Subudhi B., Atta D.** Design of a Path Following Controller for an Underactuated AUV. *Archives of Control Sciences*. 2009. V. 19 (LV), N. 3. P. 245–259.
11. **Filaretov V. F., Yukhimets D. A.** Synthesis of a System of Automatic Calculation of Program Signals for Controlling Motion of an Underwater Vehicle along a Complex Spatial Trajectory. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2010. V. 49, N. 1. P. 96–104.
12. **Filaretov V. F., Yukhimets D. A.** A Method for Forming Program Control for Velocity Regime of Motion of Underwater Vehicles along Arbitrary Spatial Trajectories with Given Dynamic Accuracy. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2011. V. 50, N. 4. P. 673–682.
13. **De Boor C.** A practical guide to splines (Revised edition). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2001. P. 366.
14. **Vaulin Yu. V., Dubrovin F. S., Kushnerik A. A., Tufanov I. E., Scherbatyuk A. F.** Malogabaritnyy avtonomnyy neobitaemyy podvodnyy apparat MARK novogo pokoleniya dlya vypolneniya grupovykh operatsiy. Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2012. № 6. С. 59–65.
15. **Denisenko M., Dubrovin F., Mun S., Nepostaev E., Suraev N., Tufanov I., Vaulin Y.** Control System of Small AUV for Multiple Vehicle Operation. *Proc. of the International Conference and Exhibition "Underwater Intervention 2011"*. New Orleans, USA. 2011.
16. **Tufanov I., Scherbatyuk A.** Development of Centralized Control System for AUV Group Operation. *Proc. of the 18-th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology*. Portsmouth, USA. 2013.
17. **Scherbatyuk A. Ph., Dubrovin F. S.** Some Algorithms of AUV Positioning Based on One Moving Beacon. *Proc. of the IFAC Workshop Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles*. FEUP, Porto, Portugal. 2012.

УДК 004:656.61.073

**В. М. Дорожко**, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., bendor@iacp.dvo.ru  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток

## Динамическая нагрузка аномальной вейвлет-волны на неподвижное препятствие

Разработана технология численного моделирования "волны-убийцы" в виде аномальной вейвлет-волны и вычислена ее динамическая нагрузка на неподвижные препятствия, имитирующие элементы конструкции судна или морского сооружения. Вычисленные значения динамической нагрузки превышают максимальные расчетные значения, предусмотренные Правилами классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства. Полученные результаты могут найти применение при проектировании морских судов и гидротехнических сооружений.

**Ключевые слова:** "волна-убийца", аномальная вейвлет-волна, вычислительная гидродинамика, динамическая нагрузка, обрушающаяся волна, неподвижное препятствие

### Введение

В последнее десятилетие активизировалось внимание к такому грозному природному явлению, как "волны-убийцы" (далее — аномальные волны). К ним относятся поверхностные морские волны с высотой 20...30 м [1]. Европейским союзом в 2000—2003 гг. был профинансирован проект "Max Wave" [2] по мониторингу поверхности мирового океана с помощью радарных спутников ERS-1 и ERS-2 Европейского космического агентства. Наблюдения показали, что аномальные волны возникают существенно чаще, чем предсказывается

теорией [1]. Так, только за период 2006—2010 гг. зарегистрировано 78 случаев возникновения аномальных волн [3], в которых повреждены суда или морские сооружения, погибли или получили ранения члены экипажей или люди в прибрежной зоне. Высокая вероятность возникновения аномальных волн и исключительная опасность встречи судов с ними определяют актуальность исследований, в том числе связанных с определением динамических характеристик воздействия аномальных волн на суда и сооружения. Случайный характер возникновения аномальных волн исключает возможность

проведения натуральных измерений динамической нагрузки (давления), создаваемой аномальными волнами, на суда и морские сооружения. В связи с этим подобные исследования проводятся как численно [4], так и в экспериментальных гидродинамических бассейнах [5].

Особенностью указанных работ в большинстве случаев является применение модельных технологий, связанных с использованием коротких волн малой высоты, которые не позволяют получить данные о значениях динамической нагрузки полномасштабных аномальных волн на суда и морские конструкции в реальной обстановке. Другим существенным недостатком является использование в экспериментальных бассейнах либо монохроматических волн, либо волн, создаваемых гидромеханическим генератором с изменяющейся частотой колебаний [6]. Натурные наблюдения показали, что аномальные волны имеют вид солитона, под огибающей которого находятся несколько максимумов [1, 7].

Анализ аномальных волн указывает на сходство их профилей с вейвлетом Морле [8], который в отличие от монохроматических волн имеет сложный пространственный спектр. Поэтому такие аномальные волны называются далее аномальными вейвлет-волнами.

В связи с вышеизложенным в данной статье рассматривается задача разработки информационной технологии численного моделирования поверхностных аномальных вейвлет-волн высотой 20...30 м, совпадающих по форме с вейвлетом Морле, в целях получения количественных значений динамической нагрузки на вертикальное и горизонтальное препятствия, имитирующие элементы конструкции корпуса судна или морского гидротехнического сооружения.

### Метод решения задачи исследования

Решение поставленной задачи выполнено методом вычислительной гидродинамики (CFD — computational fluid dynamics) [9], позволяющим численными методами реализовать виртуальный гидродинамический бассейн, в котором осуществляется формирование аномальной вейвлет-волны и моделируется ее воздействие на препятствия. В основу CFD-метода положены уравнения неразрывности несжимаемой жидкости и сохранения импульса (RANSE — Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) [9], которые могут быть записаны в тензорном виде, соответственно, как

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right] + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (-u'_i u'_j), \quad (2)$$

где  $\{i, j\} = 1, 2, 3$ ;  $x_1, x_2, x_3$  — декартовы координаты в абсолютной системе  $ox_1x_2x_3$ ;  $u_1, u_2, u_3$  — осредненные значения абсолютной скорости потока жидкости;  $u'_1, u'_2, u'_3$  — флуктуации указанной скорости, ответственные за диссипацию энергии;  $\mu$  и  $\rho$  — вязкость и плотность жидкости, соответственно;  $t$  — время;  $p$  — давление;  $\delta_{ij}$  — символ Кронекера; последний член в выражении (2) — напряжение Рейнольдса — получен осреднением флуктуационных компонент скорости.

Для вычисления напряжения Рейнольдса применена модель турбулентности  $k_f\text{-}\epsilon$  (RNG, renormalization group mathematical technique) [10], которая позволяет получать расчетные значения гидродинамических полей, близкие к их экспериментальным значениям. В связи с этим система уравнений (1), (2) дополнена уравнениями переноса турбулентной кинетической энергии ( $k_f$ ) и скорости ее диссипации ( $\epsilon$ ).

Процесс зарождения и развития аномальной вейвлет-волны можно условно представить в виде трех этапов [11]:

1) случайная пространственно-временная фокусировка спектра когерентных компонент морского волнения, в результате которой формируется вейвлет-волна. Для перехода ко второму этапу требуется выполнение условия [1] достаточности крутизны  $S = \pi H/\lambda > 0,443$  вейвлет-волны ( $H$  и  $\lambda$  — высота и длина вейвлет-волны);

2) нелинейное преобразование вейвлет-волны до аномальных высот (20...30) м [1];

3) обрушение аномальной вейвлет-волны.

В соответствии с поставленной задачей в данной работе рассматриваются два последних этапа.

Для формального описания реализуемой модели поставленной задачи выбрана правая декартова система координат  $oxuz$ , совпадающая с системой  $ox_1x_2x_3$ , при этом численное решение системы уравнений (1), (2) выполнено в расчетной области виртуального 2D-бассейна, имеющего форму прямоугольника глубиной  $h$ , сформированного в системе координат  $oxu$ , ось  $ox$  которой лежит на условной поверхности тихой воды (при отсутствии волн), а ось  $ou$  направлена вверх. Для обеспечения вычисления давления принято, что в направлении оси  $oz$  расчетная область имеет толщину, равную одному метру.

На поверхности воды создавалась аномальная бегущая вейвлет-волна, форма которой соответствует вещественной компоненте комплексного вейвлета Морле [8]. Отклонение поверхности от уровня тихой воды для такой волны описывается выражением

$$w = A \exp \left[ -2 \left( \frac{k(x - x_c)}{2\pi} \right)^2 \right] \cos[k(x - x_c) - \sigma t], \quad (3)$$

где  $A$  — амплитуда вейвлет-волны;  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\sigma = \sqrt{gk}$  и  $\lambda$  — волновое число, угловая частота и длина вейвлет-волны соответственно;  $x_c$  — координата

начального положения максимума вейвлет-волны. Выбранный коэффициент  $2\pi$  в выражении (3) обеспечивает формирование профиля вейвлет-волны с тремя максимумами.

Пример начального ( $t = 0$ ) профиля аномальной вейвлет-волны (рис. 1) имеет вид осцилляций, убывающих по мере удаления от центрального максимума, высота которого именуется начальной амплитудой ( $A$ ) аномальной вейвлет-волны. Профиль и амплитуда именуется начальными по той причине, что с течением времени за счет нелинейных преобразований, свойственных вейвлет-волне с начальной крутизной  $S > 0,443$ , изменяются как профиль, так и амплитуда вейвлет-волны.

Технология CFD-метода предполагает сеточное разбиение расчетной области, т. е. дискретизацию, в том числе и пространственного профиля вейвлет-волны ( $w$ ), с шагом  $\Delta x$ , равным размеру сеточного элемента в направлении оси  $ox$ . Применение дискретного преобразования Фурье к массиву дискретных значений начального профиля  $w$  позволило получить спектр в виде суммы комплексных спектральных амплитуд  $Y_n = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{2}{N} w(i+1) \exp(-j \cdot 2\pi ni/N)$ ,

где  $N$  — число дискретных значений профиля  $w$  вейвлет-волны;  $i$  — номер дискретного элемента

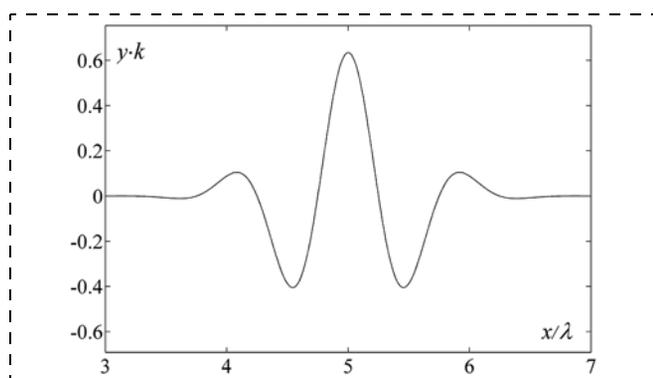


Рис. 1. Начальный пространственный профиль аномальной вейвлет-волны:  $A = 10$  м,  $\lambda = 100$  м;  $y$  — ордината профиля,  $k$  — волновое число

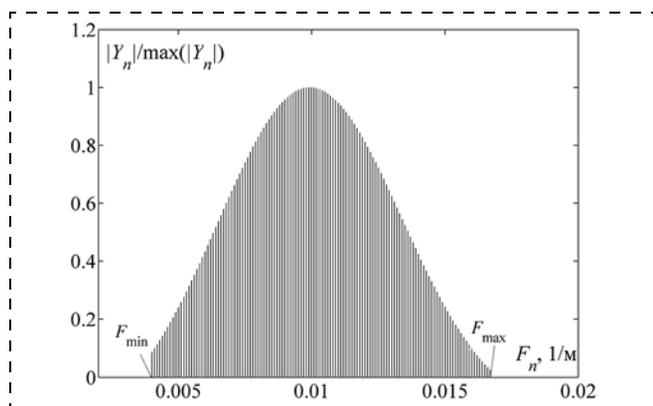


Рис. 2. Нормированный пространственный спектр начальных амплитуд аномальной вейвлет-волны с длиной центральной волны, равной 100 м

профиля  $w$ ;  $j = \sqrt{-1}$ ;  $n$  — порядковый номер комплексной спектральной амплитуды в спектре  $Y_n$ . Начальный участок спектра  $Y_n$  содержит комплексные спектральные амплитуды, длина волн которых составляет сотни метров, что требует для выполнения условий глубокого моря создания сеточной модели соответствующих геометрических размеров. Усечение пространственного спектра (от  $F_{\min}$  до  $F_{\max}$ ) комплексных амплитуд (рис. 2) позволило, с одной стороны, избежать необходимости создания виртуального бассейна с чрезмерной глубиной, а с другой, ввиду малости амплитуд отбрасываемой части спектра, — воспроизвести с высокой точностью вейвлет-волну (3), представив ее суммой бегущих монохроматических поверхностных волн

$$w(x) = \sum_{n=m}^M A_n \cos(k_n x - \sigma_n t + \varphi_n), \quad (4)$$

где  $M - m + 1$  — число комплексных спектральных амплитуд в диапазоне пространственных частот от  $F_{\min}$  до  $F_{\max}$ ;  $A_n = |Y_n|$  — спектральная амплитуда;

$$k_n = 2\pi/\lambda_n, \sigma_n = \sqrt{gk_n}, \lambda_n = 1/F_n \text{ и } \varphi_n = \arctg \frac{\text{Im } Y_n}{\text{Re } Y_n} —$$

волновое число, угловая частота, длина волны и значение фазового угла  $n$ -й компоненты спектра соответственно;  $F_n$  — вектор пространственных частот с интервалом дискретизации  $\frac{1}{\Delta x N}$ . Макси-

мальная спектральная амплитуда соответствует центральной волне спектра.

Чтобы создать на поверхности воды вейвлет-волну, на входе расчетной области было сформировано граничное условие в виде вектора суммы скоростей жидкости монохроматических поверхностных волн (4), горизонтальная ( $v_x$ ) и вертикальная ( $v_y$ ) компоненты которого определяются выражениями [12]

$$v_x = \sum_{n=m}^M \frac{gk_n A_n}{\sigma_n} \exp(k_n y) \cos(k_n x_0 - \sigma_n t + \varphi_n), \quad (5)$$

$$v_y = \sum_{n=m}^M \frac{gk_n A_n}{\sigma_n} \exp(k_n y) \sin(k_n x_0 - \sigma_n t + \varphi_n), \quad (6)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения;  $\sigma_n = \sqrt{gk_n}$  — угловая частота;  $x_0$  — координата входной границы расчетной области. Граничное условие на выходе расчетной области обеспечивается дополнительным затуханием, исключающим отражение бегущих волн спектра от границы расчетной области. Граничное условие на дне расчетной области соответствует нулевой нормальной производной скорости жидкости, а на верхней границе — атмосферному давлению. Начальные условия уравнений (1), (2) сформированы путем инициализации расчетной области от вектора скорости (5), (6), в результате

чего во всем объеме бассейна создавалось распределение амплитуд и скоростей жидкости и воздуха, соответствующее начальному ( $t = 0$ ) состоянию бегущей аномальной вейвлет-волны (см. рис. 1).

### Численное моделирование, прикладная интерпретация и обсуждение полученных результатов

Граничные пространственные частоты спектра (рис. 2) выбраны равными  $F_{\min} = 0,004 \text{ м}^{-1}$ ,  $F_{\max} = 0,0167 \text{ м}^{-1}$ , что обеспечило использование 128 монохроматических поверхностных волн для формирования аномальной вейвлет-волны. Длины указанных волн лежат в диапазоне 60...250 м. Численное моделирование аномальных вейвлет-волн выполнено в виртуальном бассейне длиной 1000 м и глубиной 125 м, обеспечивающем условия глубокого моря для самой длинной монохроматической волны. Высокая точность вычислений обеспечивалась разбиением пространства бассейна квадратными сеточными элементами со стороной 0,25 м. Кроме того, шаг дискретизации времени нестационарного решателя выбран минимальным и составил 0,0005 с. Плотность воды принята равной  $\rho = 1027 \text{ кг/м}^3$ , ускорение свободного падения  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

Определение значений длин центральных волн и начальных амплитуд, обеспечивающих в процессе нелинейного преобразования возрастание высот вейвлет-волн до аномальных значений (20...30 м) выполнено в два этапа. На первом этапе выполнены численные исследования нелинейных преобразований базовых вейвлет-волн с длиной центральной волны  $\lambda_b = 100 \text{ м}$  и несколькими начальными амплитудами  $A_b = (8, 9, 10, 11, 12) \text{ м}$ , выбираемыми поочередно. При этом установлено, что базовые вейвлет-волны с указанными начальными амплитудами в процессе нелинейного преобразования достигают высот ( $H_b$ ), лежащих в диапазоне 15,8...33,1 м. На втором этапе определены начальные амплитуды и длины центральных волн, соответствующие граничным значениям диапазона максимальных высот (20...30 м) масштабированных аномальных вейвлет-волн (см. таблицу), путем применения масштабировующих коэффициентов  $m_{20} = 20/H_b$  и  $m_{30} = 30/H_b$

Начальные амплитуды и длины центральных волн базовых и масштабированных аномальных вейвлет-волн

Базовые вейвлет-волны			Масштабированные аномальные вейвлет-волны					
Начальная амплитуда ( $A_b$ ), м	Максимальное значение		Максимальная высота 20 м			Максимальная высота 30 м		
	Высота ( $H_b$ ), м	Крутизна ( $S_b$ )	Коэффициент масштабирования $m_{20}$	Начальная амплитуда ( $A_{m20}$ ), м	Длина центральной волны ( $\lambda_{m20}$ ), м	Коэффициент масштабирования $m_{30}$	Начальная амплитуда ( $A_{m30}$ ), м	Длина центральной волны ( $\lambda_{m30}$ ), м
8	15,8	0,496	1,266	10,127	126,6	1,899	15,190	189,9
9	21,5	0,675	0,930	8,372	93,0	1,395	12,559	139,5
10	26,0	0,817	0,769	7,692	76,9	1,154	11,538	115,4
11	29,5	0,927	0,678	7,458	67,8	1,017	11,186	101,7
12	33,1	1,04	0,604	7,251	60,4	0,906	10,876	90,6

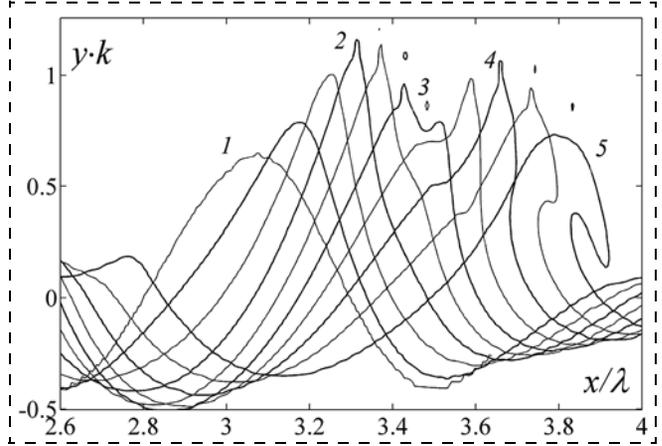


Рис. 3. Временная последовательность через интервалы 0,0625 нормированного времени  $t/T = 0...0,5625$  профилей аномальной вейвлет-волны с максимальной крутизной 0,817;  $T$  — период центральной волны;  $y$  — ордината профиля,  $k$  — волновое число

к параметрам базовых волн:  $A_{m20} = m_{20}A_b$ ,  $\lambda_{m20} = m_{20}\lambda_b$  и  $A_{m30} = m_{30}A_b$ ,  $\lambda_{m30} = m_{30}\lambda_b$ .

В целях обеспечения равных значений точности и гидродинамических условий вычислений одновременно выполнено соответствующее масштабирование геометрических размеров сеточной модели виртуального бассейна для каждой масштабируемой аномальной вейвлет-волны. Масштабированные с помощью коэффициентов  $m_{20}$  и  $m_{30}$  аномальные вейвлет-волны гарантированно достигают в процессе нелинейного преобразования высот 20 и 30 м соответственно.

Результаты численных исследований позволяют установить, что аномальные вейвлет-волны максимальной высотой от 20 до 30 м могут создавать вейвлет-волны (см. таблицу) с начальными амплитудами от 7,251 до 15,190 м и длинами центральных волн от 60,4 до 189,9 м соответственно. На рис. 3 представлен пример типичной последовательности профилей аномальной вейвлет-волны с момента ее возникновения (профиль 1) и до обрушения (профиль 5).

Следует отметить, что в каждой отдельной строке таблицы максимальные значения крутизны ( $S_b$ ) базовых и аномальных вейвлет-волн ( $S_{m30} = \pi \cdot 30/\lambda_{m30}$  или  $S_{m20} = \pi \cdot 20/\lambda_{m20}$ ) совпадают, так как в соответ-

ствии с методикой масштабирования одновременно увеличиваются или уменьшаются в одинаковое число раз как начальные амплитуды (соответственно и максимальные высоты), так и длины центральных волн аномальных вейвлет-волн, оставляя неизменными максимальные значения их крутизны. В связи с этим в одинаковые моменты нормированного времени  $t/T$  профили (рис. 3) аномальных вейвлет-волн с одинаковой максимальной крутизной геометрически подобны, т. е. совпадают в осях  $x/\lambda$  и  $yk$ .

Динамика формы профилей указывает на наличие процесса сильных нелинейных преобразований, в результате которых высота волны дважды возрастает до максимальных значений (профили 2 и 4), после чего начинается процесс ее обрушения, заканчивающийся формированием буруна (профиль 5), для которого характерен выброс падающей струи с захватом воздуха под ней.

Вертикальное препятствие (имитация борта, надстроек судна или аналогичных конструкций морских сооружений) высотой 30 м располагалось таким образом, чтобы удар аномальной вейвлет-волны по

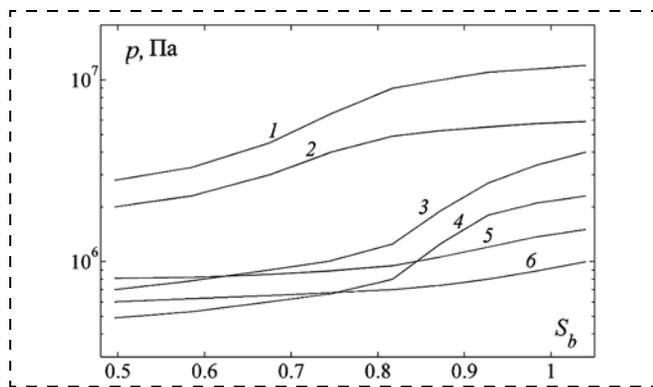


Рис. 4. Максимальное давление, создаваемое на вертикальном (1 и 2), угловом (3 и 4) и горизонтальном (5 и 6) препятствиях аномальными вейвлет-волнами высотой 30 и 20 м соответственно

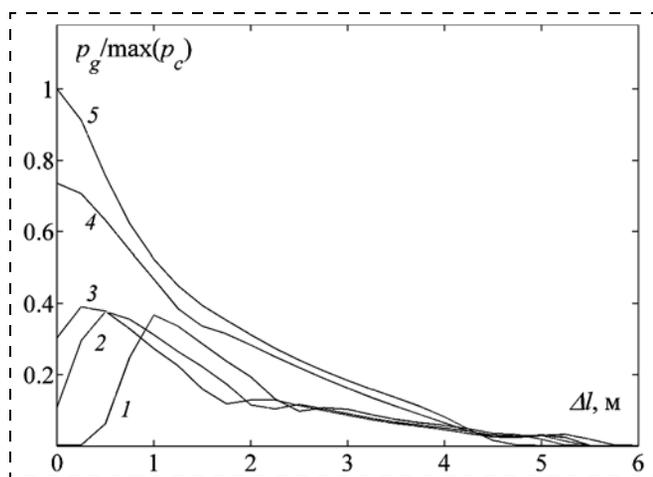


Рис. 5. Временная последовательность (через каждые 0,01 с) пространственного распределения нормированного давления (кривые 1–5) на горизонтальном препятствии вследствие удара вейвлет-волны по угловому препятствию;  $p_g$  и  $p_c$  — давления на горизонтальном и угловом препятствиях соответственно;  $\Delta l$  — расстояние до углового препятствия

препятствию приходился в момент достижения горизонтальной компонентой скорости жидкости максимального значения (профиль 4). Горизонтальное препятствие длиной 30 м, заканчивающееся угловым препятствием высотой 1 м (имитация палубы и мест соединения вертикальных элементов корпусных конструкций с палубой или аналогичных конструкций морских сооружений), располагалось с таким расчетом, чтобы обеспечивалось попадание на него падающей струи буруна аномальной вейвлет-волны в тот момент, когда скорость в струе достигала своего максимума (профиль 5). Из-за графической насыщенности рисунка препятствия на рис. 3 не показаны.

На рис. 4 представлены графики зависимости от максимальной крутизны ( $S_b$ ) максимальных значений давления, создаваемого в момент гидродинамического удара по вертикальному, горизонтальному (на удалении от углового препятствия) и угловому препятствиям аномальными вейвлет-волнами высотой 20 и 30 м.

Полученные значения давления показывают, что изменение высоты аномальной вейвлет-волны в 1,5 раза с 20 до 30 м вызывает соответствующее увеличение максимального давления на препятствиях. При этом наибольшее давление гидродинамического удара ( $2 \cdot 10^6 \dots 10^7$  Па) формируется на вертикальном препятствии.

Струя буруна, обрушающаяся на горизонтальное препятствие, в силу соотношения горизонтальной и вертикальной скоростей жидкости в ней  $v_x/v_y \geq 5$ , формирует горизонтальный поток жидкости, ударяющий в угловое препятствие высотой 1 м, в связи с чем высокое давление гидродинамического удара (до  $4 \cdot 10^6$  Па) создается не только на угловом препятствии, но и на горизонтальном — вблизи углового препятствия (рис. 5).

Вычисленные значения максимального давления при гидродинамическом ударе, создаваемого аномальной вейвлет-волной на горизонтальном, вертикальном и угловом препятствиях, превышают на один-два порядка значения расчетной нагрузки, получаемой в соответствии с Правилами классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства [13]. Особым разрушительным воздействием аномальной вейвлет-волны могут подвергаться вертикальные элементы корпуса и надстройки судна, а также места соединения вертикальных и горизонтальных элементов палубных конструкций. Учитывая, что выбранные преграды согласно предложенной технологии численного моделирования неподвижны, полученные данные о максимальной динамической нагрузке аномальной вейвлет-волны являются минимальными для судов, удерживаемых курсом на волну, и максимальными для судов, идущих на попутном волнении.

Отметим, что весь процесс формирования аномальной вейвлет-волны (от начальной до максимальной высот) протекает скоротечно и занимает

не более одного периода центральной волны. За это время аномальная вейвлет-волна пробегает расстояние не более одной длины центральной волны. Все это свидетельствует об отсутствии возможности осуществления маневра судна для уклонения от встречи с аномальной вейвлет-волной. Следовательно, встреча судна с аномальной вейвлет-волной характеризуется внезапностью и угрожает, прежде всего, целостности его обшивки и палубных конструкций.

### Заключение

Поставленная в работе задача решена: разработана технология численного моделирования аномальной вейвлет-волны, оценены максимальные значения динамической нагрузки аномальных вейвлет-волн на имитаторах корпусных конструкций судна и морских сооружений.

Следует отметить, что применение CFD-технологии оказалось результативным во всех случаях, когда выполнялась численная оценка взаимодействия морских объектов с периодическим волнением, ветром [14, 15] или, как в данном случае, с "волнами-убийцами".

Результаты оценки максимального давления гидродинамического удара, создаваемого аномальной вейвлет-волной, могут быть использованы при проектировании морских объектов для исключения повреждения корпуса судна, а также опор и трубопроводов гидротехнических сооружений.

В целях обеспечения безопасности можно рекомендовать судоводителям избегать плавания в штормовых условиях в районах [1] с повышенной вероятностью появления "волн-убийц".

### Список литературы

1. Куркин А. А., Пелиновский Е. Н. Волны-убийцы: факты, теория и моделирование. Н. Новгород: ННГТУ, 2004. 158 с.
2. Rogue waves — forecast and impact on marine structures. URL: <http://www.kuleuven.be/hydr/downloads/MaxWave.pdf> (дата обращения 10 сентября 2013 г.).
3. Nikolkina I., Didenkulova I. Rogue waves in 2006–2010 // Natural hazards and Earth system sciences. 2011. V. 11. P. 2913–2924.
4. Clauss G. F., Schmittner C. E., Stuck R. Numerical wave tank — simulation of extreme waves for the investigation of structural responses // Proc. of OMAE 2005, 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. — Halkidiki, Greece, 2005. P. 785–789.
5. Greco M., Landrini M., Faltinsen O. Impact flows and loads on ship-deck structures // Journal of Fluids and Structures. 2004. V. 19. P. 251–275.
6. Perlin M., Jianhui He. An experimental study of deep water plunging breakers // Phys. Fluids. 1996. V. 8, N. 9. P. 2365–2374.
7. Fonseca N., Soares C., Pascoal R. Structural loads induced in a container-ship by abnormal wave conditions // Journ. Mar. Sci. Technol. 2006. N. 11. P. 245–259.
8. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике. М.: СОЛОН-Р, 2002. 448 с.
9. Blazek J. Computational fluid dynamics: principles and applications. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2005. 470 p.
10. Yakhot V., Orszag S. Renormalization group analysis of turbulence: Basic theory // Journal of scientific computing. 1986. V. 1, N. 1. P. 1–51.
11. Ruban V., Kodama Y., Ruderman M. and et al. Rogue waves — towards a unifying concept: Discussions and debates // The European physical journal special topics. 2010. Iss. 185. P. 5–15.
12. Song C., Sirviente A. I. A numerical study of breaking waves // Physics of fluids. 2004. V. 16, N. 7. P. 2649–2667.
13. Правила классификации и постройки морских судов. Т. 1. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2012. 466 с.
14. Dorozhko V. M. Detecting the dangerous development of rolling motion of the contour of a sea-going vessel under the conditions of wind wave effects // Measurement Techniques. 2012. V. 55, N. 3. P. 297–302.
15. Дорожко В. М. Идентификация снижения сопротивляемости морского судна к динамическому воздействию ветровой нагрузки // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 5. С. 58–63.

V. M. Dorozhko, Senior Staff Scientist, bendor@iacp.dvo.ru, Institute of Automation and Control Processes, Far East Branch, Russian Academy of Sciences (IACP FEB RAS), Vladivostok, Russia

## Dynamic Load of the Abnormal Wavelet-Wave on the Motionless Obstacle

*The article is devoted to study of the impact of a rogue wave with the shape similar to the Morlet wavelet on stationary obstacles which imitate the elements of ship hull or hydraulic engineering marine structure. Thus we use the term the abnormal wavelet-wave for such rogue wave. The main idea is to perform CFD-simulation of evolution of abnormal wavelet-waves with the height up to 20–30 meters to obtain pressure fields on vertical or horizontal obstacles. To simulate this process the propagating surface wavelet-waves were created in a numerical tank and it is shown that as a result of nonlinear transformation their height may grow to 20–30 meters. The initial amplitude and length of the wavelet-wave which cause the growth of its height to abnormal 20–30 meters are established. The conditions for self-similarity of wavelet-wave profiles during the process of their nonlinear transformation are derived. To estimate the maximal pressure values created by abnormal wavelet-wave the vertical wall was introduced in front of the wavelet-wave when it reached its maximal height. To study extreme pressure values for horizontal obstacle they were positioned at the location of the breaking wavelet-waves when their flow attains the maximal velocity. It was found that the highest ( $2,0 \cdot 10^6 \dots 1 \cdot 10^7$  Pa) pressure takes place on the vertical obstacle. At the junction of a horizontal obstacle and a vertical wall (a corner obstacle) a breaking wavelet-wave creates considerable pressure values up to  $4 \cdot 10^6$  Pa as well. The evolution of abnormal wavelet-wave from initial to maximal height takes no more than one wavelet period. During this time the abnormal wavelet covers the distance not longer than length of central wave. The impact of abnormal wavelet-wave creates on sea objects the pressure exceeding the design parameters of ships and sea structures. Thus the case of a sea object to experience abnormal wavelet-wave is distinguished by the suddenness of the accident and puts its structure into immediate danger.*

**Keywords:** rogue wave, abnormal wavelet-wave, computational fluid dynamics, dynamic load, breaking waves, motionless obstacle

## References

1. Kurkin A. A., Pelinovskiy E. N. Freak-waves, theory and modeling. N. Novgorod: NNSU, 2004. 158 p.
2. Rogue waves — forecast and impact on marine structures [Electronic resource]. URL: <http://www.kuleuven.be/hydr/downloads/MaxWave.pdf> (date of access: September, 10, 2013 year).
3. Nikolkina I., Didenkulova I. Rogue waves in 2006–2010. *Natural hazards and Earth system sciences*. 2011. V. 11. P. 2913–2924.
4. Clauss G. F., Schmittner C. E., Stuck R. Numerical wave tank — simulation of extreme waves for the investigation of structural responses. *Proc. of OMAE 2005, 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Halkidiki, Greece, 2005. P. 785–789.
5. Greco M., Landrini M., Faltinsen O. Impact flows and loads on ship-deck structures. *Journal of Fluids and Structures*. 2004. V. 19. P. 251–275.
6. Perlin M., Jianhui He. An experimental study of deep water plunging breakers. *Phys. Fluids*. 1996. V. 8, N. 9. P. 2365–2374.
7. Fonseca N., Soares C., Pascoal R. Structural loads induced in a container-ship by abnormal wave conditions. *Journ. Mar. Sci. Technol.* 2006. N. 11. P. 245–259.
8. D'jakonov V. P. Wavelets. From the theory to practice. M.: SOLON-R, 2002. 448 p.
9. Blazek J. Computational fluid dynamics: principles and applications. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2005. 470 p.
10. Yakhot V., Orszag S. Renormalization group analysis of turbulence: Basic theory. *Journal of scientific computing*. 1986. V. 1, N. 1. P. 1–51.
11. Ruban V., Kodama Y., Ruderman M. and et al. Rogue waves — towards a unifying concept: Discussions and debates. *The European physical journal special topics*. 2010. Iss. 185. P. 5–15.
12. Song C., Sirviente A. I. A numerical study of breaking waves. *Physics of fluids*. 2004. V. 16, N. 7. P. 2649–2667.
13. Rules of classification and block construction of ocean vessels, V. 1. SPb.: The Russian marine register of shipping industry, 2012. 466 p.
14. Dorozhko V. M. Detecting the dangerous development of rolling motion of the contour of a sea-going vessel under the conditions of wind wave effects. *Measurement Techniques*. 2012. V. 55, N. 3. P. 297–302.
15. Dorozhko V. M. Identification of decrease in resistibility of the ocean vessel to dynamic influence of a wind loading. *Mehatronika, avtomatizacija, upravljenje*. 2011. N. 5. P. 58–63.

УДК 004.932.2:007.52:681.51

С. Н. Загоруйко, аспирант, [zagoruyko2@gmail.com](mailto:zagoruyko2@gmail.com), В. Н. Казьмин, аспирант [slvk@list.ru](mailto:slvk@list.ru),  
В. П. Носков, канд. техн. наук, доц., [noskov\\_mstu@mail.ru](mailto:noskov_mstu@mail.ru),  
МГТУ им. Н. Э. Баумана

## Навигация БПЛА и 3D-реконструкция внешней среды по данным бортовой СТЗ

Рассмотрена актуальная задача обеспечения автономного полета беспилотного летательного аппарата в неизвестном заранее пространстве в условиях плотной городской застройки или внутри зданий при искаженном магнитном поле Земли и отсутствии внешнего навигационного поля. Предложен подход к решению навигационной задачи и 3D-реконструкции модели внешней среды по данным объемного зрения в процессе полета.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, решение навигационной задачи, объемное зрение, система автоматического управления

### Введение

В настоящее время быстрое развитие и широкое применение получают различные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) военного, специального и гражданского назначения. БПЛА могут иметь систему дистанционного, автономного управления или их комбинацию и оснащаются бортовыми датчиками угловых положений и линейных перемещений, некоторые (в основном средние и тяжелые) БПЛА — полными навигационными системами. Наибольшее распространение получили БПЛА для разведки и мониторинга районов будущих боевых действий, охраняемых территорий и объектов. Практически все разведывательные БПЛА поставляют на пульт управления по радиоканалу или по возвращению фото- или видеoinформацию, полученную вдоль траектории полета.

В военных конфликтах в последнее время большая доля приходится на боевые действия в городских условиях (в том числе в зданиях), и по оценкам экспертов [1] наблюдается устойчивая тенден-

ция ее роста. Специальные операции ФСБ, МВД (контртеррористические операции, мероприятия по поддержанию правопорядка) и МЧС (ликвидация последствий аварий, катастроф и пожаров) также в основном проводятся в городских условиях и в зданиях (кинотеатры, вокзалы и аэропорты, энергоблоки атомных станций, промышленные зоны). При проведении таких операций в первую очередь необходима разведка, оперативное проведение которой могут обеспечить БПЛА. Рассмотрим специфику использования БПЛА в данных условиях, сформулируем соответствующие требования к летательному аппарату, к его системам управления, навигации и сбора разведывательной информации и определим их облик и конструктивные решения.

### Актуальность и специфика использования БПЛА вертолетного типа в урбанизированной среде

В условиях плотной городской застройки, а тем более внутри зданий, не требуется высокая скорость полета, но требуется повышенная маневрен-

ность и малые габаритные размеры. Наиболее подходящей в данном случае является конструкция вертолетного типа с четырьмя (квадрокоптеры) или более (мультикоптеры) электродвигателями с воздушными винтами на выходном валу, симметрично расположенными по краям рамы (рис. 1, см. третью сторону обложки). Такая компоновка совмещает компактность конструкции с высокой управляемостью и маневренностью.

Вращающие моменты и силы, создаваемые воздушными винтами (рис. 1), определяются по формулам

$$M_x = aL(n_1^2 - n_3^2);$$

$$M_y = aL(n_2^2 - n_4^2);$$

$$M_z = b[(n_1^2 + n_3^2) - (n_2^2 + n_4^2)];$$

$$F = a(n_1^2 + n_2^2 + n_3^2 + n_4^2),$$

где  $n_i$  — частота вращения вала  $i$ -го электродвигателя;  $a$ ,  $b$  — коэффициенты, зависящие от характеристик воздушного винта;  $L$  — расстояние между осью  $Z$  и осью вала электродвигателя;  $F$  — подъемная сила;  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  — вращающие моменты вокруг трех основных осей.

Как видно из выражений, изменяя частоты вращения воздушных винтов, можно задавать вращающие моменты вокруг трех осей и подъемную силу.

Построению систем управления БПЛА, в том числе вертолетного типа, посвящено большое число работ, например [2–4]. В работе [2] рассмотрены особенности построения бортовых систем беспилотного вертолета в режиме маловысотного полета, в статье [3] — алгоритмы угловой стабилизации при полете квадрокоптера, а в работе [4] — вопросы управления параметрами полета квадрокоптера при движении по заданной траектории. В частности, в работе [2] предложена математическая модель динамики управляемого движения вертолета и функциональная схема интегрированной бортовой системы, включающая БИНС, GPS-приемник, радиобароалтиметр и корреляционно-экстремальные средства навигации, обрабатывающие данные РЛС или лазерного локатора. Некоторые результаты, описанные в работах [2–4], могут быть использованы в части непосредственного управления БПЛА и в части обработки известной траектории. В части же автономного тактического уровня управления (автоматического построения траектории) в рассматриваемых условиях полета и при весовых ограничениях, а именно, в условиях, когда не работает спутниковая навигация, экранировано магнитное поле Земли и невозможно использовать полнофункциональную БИНС, возникают существенные проблемы с решением полной навигационной задачи и построением объемной модели окружающего пространства. В данном исследовании обе эти центральные задачи решены путем обра-

ботки информации, поступающей от бортовых СТЗ и малогабаритных твердотельных трехосных акселерометра и гироскопа. Акселерометр позволяет измерять абсолютные значения углов крена и дифферента, а гироскоп вследствие ухода нуля и ошибки интегрирования угловых скоростей — только относительные значения углов крена, дифферента и курса.

### Принципы построения автономной системы управления полетом

Система управления БПЛА должна иметь возможность работать в дистанционном режиме — в зоне прямой видимости или уверенного радиосвязи (например, на участках взлета-посадки) и полностью в автономном режиме (на участках полета при отсутствии радиосвязи, что характерно для районов с плотной застройкой, промышленных зон и внутри зданий). Если принципы создания и работы системы дистанционного управления известны и не требуют пояснений, то система полностью автономного управления полетом в рассматриваемых условиях существенно отличается от традиционных и требует более подробного рассмотрения. Традиционные системы автопилотирования в своей основе содержат ряд следящих контуров (курса, скорости, высоты, крена, дифферента, широты и долготы места) с обратной связью от навигационной системы, согласованная работа которых обеспечивает автоматическую обработку маршрутного задания — траектории полета, заранее известной системе управления. В нашем же случае траектория полета известна приблизительно, точно известны лишь точки старта и посадки, а также последовательность промежуточных точек (или их окрестности) обязательного посещения, траектория между которыми должна строиться и корректироваться в процессе полета по данным бортовых устройств с учетом конфигурации окружающего пространства, координат текущего положения и целевой на данный момент промежуточной точки. Таким образом, бортовая система автономного управления должна обеспечивать определение текущих координат (трех линейных и трех угловых) и иметь средства формирования трехмерной объемной модели окружающего пространства, состоящей из

- подмножества запрещенных для полета положений БПЛА, соответствующих препятствиям;
- подмножества разрешенных для полета положений, соответствующих свободному от препятствий пространству;
- двух положений, принадлежащих подмножеству разрешенных положений и соответствующих текущему и целевому положениям БПЛА.

Такая модель позволяет на подмножестве разрешенных положений между текущим и целевым положениями находить безопасную траекторию [5], которая затем может быть отработана соответствующей системой управления [4]. Структурная схема

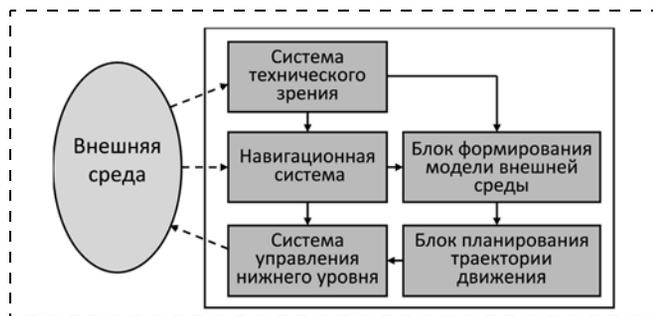


Рис. 2. Структурная схема автономной системы управления БПЛА

автономной системы управления полетом приведена на рис. 2.

### Система с 2D-лазерным сенсором

Для формирования трехмерной модели окружающего пространства БПЛА, так же как и для наземных мобильных транспортных роботов, в качестве системы технического зрения (СТЗ) можно использовать 3D-лазерный сенсор [6], но со сферической или близкой к сферической форме зоны обзора. В настоящее время существующие 3D-лазерные сенсоры имеют малые углы обзора и неприемлемые для нашего случая массогабаритные характеристики и малодоступны. 3D-лазерный сенсор можно также получить из 2D-лазерного сенсора, закрепив его на управляемом поворотном устройстве (сканаторе), что также приводит к неприемлемым массогабаритным характеристикам.

Приемлемым решением является жесткое закрепление малогабаритного 2D-лазерного сенсора на аппарате таким образом, чтобы плоскость сканирования была вертикальна, а дополнительную степень сканирования можно реализовать за счет управляемого вращения аппарата вокруг вертикальной оси. Например, 2D-лазерный сенсор UTM-30LX, имеющий сектор сканирования  $270^\circ$ , можно разместить так, что конструкции аппарата будут находиться в "мертвой" зоне (рис. 3, см. третью сторону обложки), а зона обзора при вращении аппарата будет соответствовать сфере без верхнего конуса с телесным углом в  $90^\circ$  (рис. 4), что вполне достаточно для формирования трехмерной модели полетного пространства.

Для нахождения траектории в разрешенном для полета пространстве необходимо знать текущее положение БПЛА (целевые положения заданы и известны). Как уже отмечалось выше, угловые положения аппарата определяются блоком инерциальных датчиков, которые позволяют измерить абсолютные крен и дифферент и относительный курс. Наибольшие проблемы для сверхлегкого БПЛА связаны с бортовыми средствами определения абсолютного курса и линейных перемещений, поскольку спутниковые навигационные системы и

магнитометры не работают в экранированном пространстве, а малогабаритные полные инерциальные навигационные системы необходимой точности не существуют.

Перспективным для решения данной проблемы является использование данных дальнометрической СТЗ. При этом высота полета может быть измерена непосредственно, а две горизонтальные координаты и курс могут быть определены методами экстремальной навигации [7] по последовательности горизонтальных сечений дальнометрических изображений внешней среды, получаемых в процессе полета (рис. 4). Поскольку крен и дифферент известны, то подмножество измерений, соответствующее горизонтальному сечению дальнометрического изображения, легко определяется и при отклонении вертикальной оси аппарата от местной вертикали. Для достоверного определения искомым координат методами экстремальной навигации любые два соседних сечения рассматриваемой последовательности должны иметь:

- непустое пересечение (достигается необходимой частотой формирования дальнометрических изображений);
- достаточную подробность (обеспечивается необходимой скоростью вращения аппарата вокруг

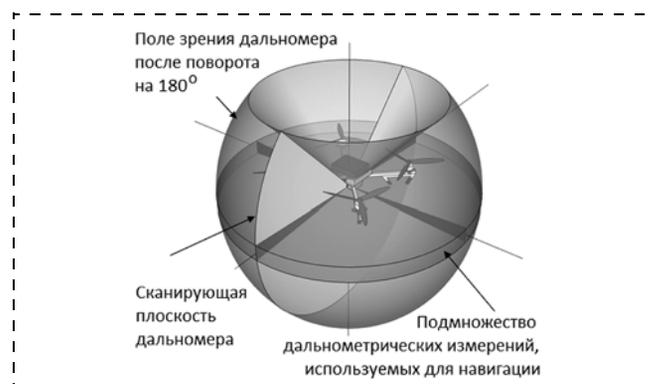


Рис. 4. Формирование объемного дальнометрического изображения за счет вращения аппарата

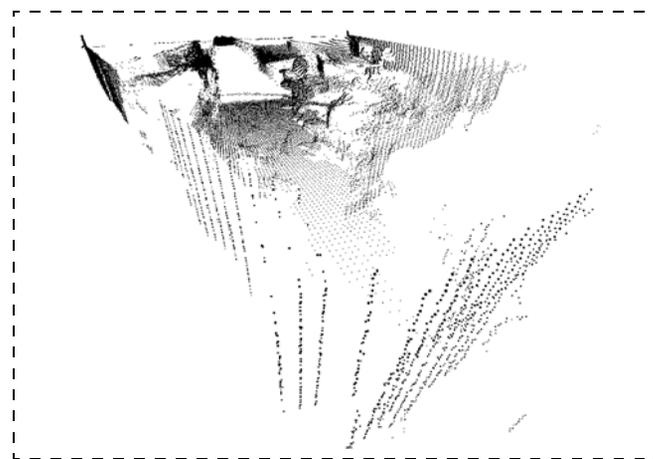


Рис. 5. Объемное дальнометрическое изображение помещения

вертикальной оси) и точность измерений (обеспечивается характеристиками лазерного сенсора и датчика курса);

- конфигурацию окружающего пространства, обеспечивающую надежную работу алгоритмов экстремальной навигации (как правило, конфигурация городской среды и помещений удовлетворяет данному требованию).

На рис. 5 приведено объемное дальнометрическое изображение помещения, полученное вращением БПЛА с 2D-лазерным сенсором UTM-30LX вокруг вертикальной оси.

На рис. 6 (см. третью сторону обложки) приведены горизонтальные сечения двух таких дальнометрических изображений помещения, полученных из разных точек пространства.

Разность искоемых линейных координат и курса между этими точками определяется совмещением соответствующих двух горизонтальных сечений по области их пересечения (рис. 7, см. третью сторону обложки) и соответствует глобальному максимуму корреляционной функции или минимуму функции разности дальнометрических изображений [7].

Функция разности дальнометрических изображений в точке решения имеет выраженный минимум, который может быть найден методами оптимизации с точностью, которая зависит не только от конфигурации внешней среды, но и от точности измерения дальности и точности измерения углов сканирования.

Зависимость ошибки вычисления приращения координат описанным выше методом от ошибки измерения дальности в дальнометрическом изображении получена путем математического моделирования, подтверждена экспериментально и приведена на рис. 8 (зависимость от ошибки измерения углов сканирования аналогична).

В соответствии с паспортными данными существующих в настоящее время сканирующих лазерных сенсоров ошибка измерения дальности составляет не более 3...5 см, поэтому ошибка вычисления приращения координат на одном цикле, как

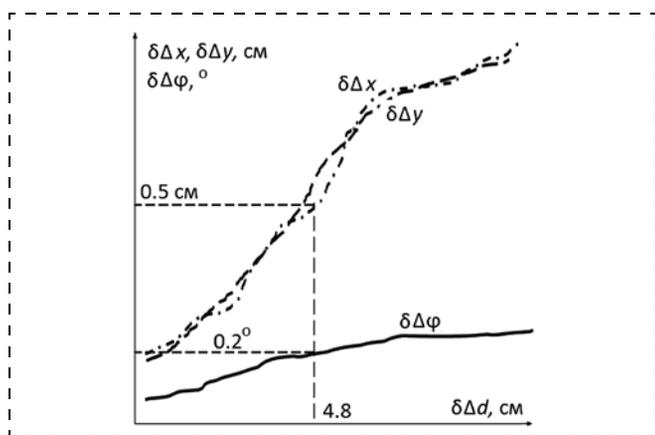


Рис. 8. Зависимость ошибки вычисления приращения координат от ошибки измерения дальности

это видно из графиков, приведенных на рис. 8, составит по линейным координатам не более 0,5 см, а по курсу — не более 0,2°. Максимальная дальность современных сканирующих лазерных сенсоров составляет 100 м, а эффективная (в рассматриваемых условиях их использования) — 10...20 м, поэтому можно приближенно принять, что на каждые 15 м полета необходимо выполнить один цикл определения координат. Тогда на 150 м автономного полета необходимо выполнить 10 циклов, и верхняя граница суммарной ошибки определения текущего положения составит 5 см по линейным координатам и 2° по курсу, что позволит сделать вывод о возможности использования рассмотренного метода не только для навигационного обеспечения автономного полета, но и для объемного дальнометрического картографирования окружающего пространства [8]. Последнее обстоятельство существенно повышает живучесть БПЛА вследствие возможности построения объединенной объемной модели с размерами, на порядок большими размеров зоны одного обзора, что обеспечивает автономный выход ("вылет") из тупиков и лабиринтов соответствующего размера.

Вследствие увеличения навигационной ошибки пропорционально дальности полета дальность полета ограничена заданной точностью позиционирования в целевой точке. Однако для полетов с возвратом в точку старта по той же траектории дальность ограничена только энергетическим ресурсом, так как при возврате определение текущего положения можно выполнять не по предыдущему изображению, а по ближайшему в данный момент времени "старому" изображению, полученному еще при удалении от точки старта. При этом по мере приближения к точке старта при возврате навигационная ошибка будет пропорционально уменьшаться. Очевидно, что для этого необходимо хранить в памяти системы управления все изображения с координатами их получения и использовать их по мере необходимости, как опорные [7].

### Система с 3D-дальномером с активной подсветкой

Установка на БПЛА 3D-дальномера с активной подсветкой (например, RGB-D камеры типа Kinect или Asus Xtion Live Pro) позволяет сразу без дополнительных маневров БПЛА (вращение БПЛА вокруг вертикальной оси в рассматриваемом выше случае) формировать трехмерные дальнометрические изображения внешней среды в телесном угле обзора и использовать их для решения навигационной задачи и построения объединенной объемной модели в процессе полета в темное время суток или при искусственном освещении внутри зданий (при солнечном освещении данные приборы работают ненадежно). При этом возможно вычислять все шесть координат положения аппарата в пространстве (три линейных и три угловых) исключительно по дальнометрическим данным. Преимуществом

данного подхода является последовательная интеграция 3D-дальнометрических изображений в формируемую модель пространства значительно лучшего качества, чем одиночные дальнометрические изображения. Здесь модель геометрии окружающего пространства представляется с помощью функции объема, задающей для каждой точки трехмерного пространства расстояние до ближайшей поверхности (препятствия), при этом от знака этой функции зависит, находится ли эта точка вне или внутри поверхности [9]. Вычисление координат сенсора и БПЛА происходит непосредственно по сформированной модели, что обеспечивает обратную связь с прошлыми положениями и дает на порядок лучшие результаты, чем вычисление приращения координат по двум последовательным дальнометрическим изображениями.

Преобразование координаты нового положения сенсора и объекта управления  $\xi$  нового 3D-дальнометрического изображения относительно имеющейся функции объема  $\psi: R^3 \rightarrow R$  задается следующим квадратичным функционалом:

$$E(\xi) = \sum_{i,j \in M} \|\psi_{i,j}(\xi)\|^2, \quad (1)$$

где  $i, j \in M$  — индексы дальнометрических пикселей в дальнометрическом изображении.

Решение (1) находится с помощью метода Гаусса—Ньютона. Разложение функции  $\psi$  относительно  $\xi$  в ряд Тейлора дает:

$$\psi(\xi^{(k)}) \approx \psi(\xi) + \nabla\psi(\xi^{(k)})(\xi - \xi^{(k)}), \quad (2)$$

где  $\nabla\psi(\xi^{(k)})$  — градиент функции объема;  $k$  — номер итерации.

Подстановка (2) в (1) и дифференцирование по  $\xi^{(k)}$  дают уравнение

$$\frac{dE}{d\xi^{(k)}} = -2 \sum_{i,j \in M} \nabla\psi(\xi^{(k)})(\psi(\xi) + \nabla\psi(\xi^{(k)})(\xi - \xi^{(k)})) = 0. \quad (3)$$

Пусть

$$A = \sum_{i,j \in M} \nabla\psi_{i,j}(\xi^{(k)})\nabla\psi_{i,j}(\xi^{(k)}),$$

$$b = \sum_{i,j \in M} \nabla\psi_{i,j}(\xi^{(k)})\psi_{i,j}(\xi^{(k)}).$$

Тогда (3) приводится к системе линейных уравнений:

$$b + A(\xi - \xi^{(k)}) = 0. \quad (4)$$

Система (4) является сильно переопределенной относительно  $\xi^{(k)}$ , а на функцию  $\psi$  оказывают влияние шумы сенсора, поэтому для решения целесообразно применять робастные методы наименьших квадратов. Предлагается использовать регуляризацию Тихонова, тогда решение (4) сводится к поиску минимума функционала

$$\|b + A(\xi - \xi^{(k)})\|_2^2 + \delta\|P^{1/2}\xi^{(k)}\|, \quad (5)$$

где  $P$  — матрица ковариации шума, оказывающего влияние на  $\psi$ ;  $\delta$  — параметр регуляризации.

Если считать этот шум гауссовым, решением (5) является

$$\xi^{(k)} = \xi - (A^T A + \delta I)^{-1} A^T b.$$

Таким образом, в ходе итеративной оптимизации относительно начального значения  $\xi^{(0)}$  находится оптимальное положение новой дальнометрической карты глубины относительно имеющейся функции объема  $\psi$ . Заметим, что разложение (2) является верным только в малой окрестности  $\xi$  и должно сбрасываться к нулевому после некоторого числа итераций. Оптимизация останавливается, как только шаг становится меньше заданного значения, либо превышено максимальное число итераций.

При отсутствии других данных о перемещении сенсора, кроме визуальной информации, в качестве начального приближения  $\xi^{(0)}$  может быть выбрано нулевое или решение (1) для предыдущей карты глубины. Но, поскольку на борту имеется инерциальный модуль, в качестве начального приближения предлагается использовать обработанные фильтром Калмана данные с акселерометров и гироскопов БПЛА. Это позволяет значительно ускорить вычисление  $\xi$  на каждом шаге.

Также отметим, что параметр регуляризации  $\delta$  оказывает прямое влияние на скорость схождения алгоритма и точность найденного решения.

После нахождения положения новой карты глубины происходит обновление функции объема. При этом каждая точка дискретизации обновляется методом бегущего среднего, т. е. для каждой точки хранится вес  $W$  и значение  $D$ , обновляемое по формуле

$$D := \frac{WD + w_{n+1}d_{n+1}}{W + w_{n+1}};$$

$$W := W + w_{n+1},$$

где  $w_{n+1}$  и  $d_{n+1}$  — вес и значение для новой карты глубины.

Современные вычислители позволяют определять все шесть координат положения БПЛА в пространстве относительно начальной точки движения на основе данных 3D-сенсора и малогабаритных



Рис. 9. Функциональная схема автономной системы управления БПЛА

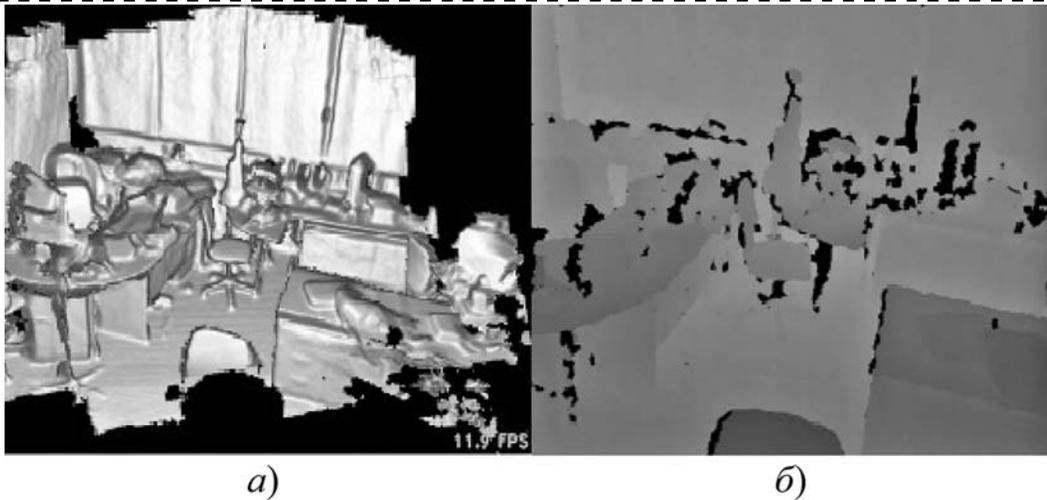


Рис. 10. Результат формирования объемной модели окружающего пространства:  
 а — 3D-модель пространства; б — одиночное дальнометрическое изображение

твердотельных инерциальных датчиков (например, ADIS16448) в реальном времени. Вычисление каждого положения сенсора (объекта управления) при этом на процессоре Intel Core i5 на борту БПЛА занимает около 50 мс. Формируемая при этом модель окружающего пространства и получаемые текущие координаты используются для планирования траектории полета БПЛА. Функциональная схема автономной системы управления полетом приведена на рис. 9.

### Заключение

Формируемая модель может быть использована не только для обеспечения автономного полета, но и (при существовании канала связи) для визуализации окружающего объекта управления пространства. При этом может быть использован метод проекции лучей из пары соответствующих точек для генерирования стереопары изображений пространства. При наличии соответствующего оборудования визуализации у оператора будет создаваться ощущение присутствия, что позволит существенно повысить эффективность дистанционного режима управления. Также возможно визуализировать виртуальное перемещение в пространстве перед непосредственным движением аппарата. Кроме того, наличие синхронной видеосъемки позволяет после возвращения БПЛА в стационарных условиях с помощью имеющегося уже в настоящее время прикладного программного обеспечения [8] построить объемные визуально-подобные модели разведанного пространства и обеспечить тем самым оперативное и эффективное планирование боевых действий или других спецопераций в экстремальных условиях [1].

В заключение продемонстрируем работу разработанных программно-аппаратных средств, реализующих предложенные в данной статье методы и алгоритмы обработки визуальной и навигационной информации.

На рис. 10 показана визуализация 3D-модели помещения (рис. 10, а), сформированной по последовательности дальнометрических изображений, и одиночное дальнометрическое изображение (рис. 10, б).

На рис. 11 (см. третью сторону обложки) приведена сформированная 3D-модель с различных точек виртуального наблюдателя.

### Список литературы

1. Лашов В. С., Носков В. П., Рубцов И. В., Рудянов Н. А., Рябов А. В., Хрущев В. С. Бой в городе. Боевые и обеспечивающие роботы в условиях урбанизированной территории // Известия ЮФУ. Технические науки. Таганрог: Изд-во ТИ ЮФУ, 2011. № 3. С. 142–146.
2. Веремеенко К. К., Желтов С. Ю., Ким Н. В. и др. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / Под ред. М. Н. Красильщикова, Г. Г. Себрякова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 556 с.
3. Зенкевич С. Л., Галустьян Н. К. Разработка математической модели и синтез алгоритма угловой стабилизации движения квадрокоптера // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 3. С. 27–32.
4. Белоконов С. А., Золотухин Ю. Н., Мальцев А. С., Нестеров А. А., Филиппов М. Н. Управление параметрами полета квадрокоптера при движении по заданной траектории // Автоматика. 2012. № 5. С. 32–41.
5. Каляев А. В., Носков В. П., Чернухин Ю. В., Каляев И. А. Однородные управляющие структуры адаптивных роботов. М.: Наука, 1990. 147 с.
6. Кузин Ю. Р., Носков А. В., Носков В. П. Разработка и исследование СТЗ для обеспечения автономного движения // Науч.-техн. сб. "Оборонная техника". М.: НТЦ "Информтехника", 2001. С. 34–39.
7. Носков В. П., Носков А. В. Навигация мобильных роботов по дальнометрическим изображениям // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 12. С. 16–21.
8. Носков В. П., Рубцов И. В., Романов А. Ю. Формирование объединенной модели внешней среды на основе информации видеокамеры и дальномера // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 8. С. 2–5.
9. Bylow E., Sturm J., Kerl C., Kahl F., Cremers D. Real-Time Camera Tracking and 3D Reconstruction Using Signed Distance Functions // Robotics: Science and Systems Conference (RSS), 2013.

## 3D Vision-Based Unmanned Vehicle Navigation and 3D Reconstruction of Environments

*In this article we investigate the problem of autonomous flight of small-sized helicopter type unmanned vehicle in apriory indefinite GPS-denied outdoor and indoor environments. The main critical tasks in this case, except for the problem of flight stabilization, are the problem of determining of the current linear and angular coordinates of the control object and the formation of 3D model of the surrounding space in the fixed coordinate system. An approach we describe is aimed to solve in-flight the 3D vision-based vehicle localization problem and 3D reconstruction of static indoor environments. Two variants of 3D image formation of the surrounding space are considered: using 2D laser rangefinder UTM-30LX, while 3D image is obtained by the rotation of the vehicle around the vertical axis, and using 3D rangefinder with active backlight Asus Xtion Live Pro. Dependence of coordinates calculation errors on the sensors error are obtained, performance of proposed algorithms for used computational tools are evaluated. The structural and functional circuits of onboard control system and the results of field tests of developed algorithms, software and hardware tools are given.*

**Keywords:** unmanned vehicle, localization problem solving, SLAM, 3D vision, autonomous control system

### References

1. **Lapshov V. S., Noskov V. P., Rubtsov I. V., Rudianov N. A., Ryabov A. V., Khrushchev V. S.** Boy v gorode. Boevye i obespechivayushchie roboty v usloviyakh urbanizirovannoy territorii. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*. Taganrog: Izd-vo TI YuFU, 2011. N. 3. P. 142–146.
2. **Veremeenko K. K., Zheltov S. Yu., Kim N. V.** i dr. Sovremennye informatsionnye tekhnologii v zadachakh navigatsii i navedeniya bespilotnykh manevrennykh letatel'nykh apparatov. Pod red. M. N. Krasil'shchikova, G. G. Sebyakova. M.: FIZMATLIT, 2009. 556 p.
3. **Zenkevich S. L., Galustyan N. K.** Razrabotka matematicheskoy modeli i sintez algoritma uglovoy stabilizatsii dvizheniya kvadropkoptera. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2014. N. 3. P. 27–32.
4. **Belokon' S. A., Zolotukhin Yu. N., Mal'tsev A. S., Nestepov A. A., Filippov M. N.** Upravlenie papametpaii poleta kvadropkoptera ppi dvizhenii po zadannoi tpaektanii. *Avtometriya*. 2012. N. 5. S. 32–41.
5. **Kalyaev A. V., Noskov V. P., Chernukhin Yu. V., Kalyaev I. A.** Odnorodnye upravlyayushchie struktury adaptivnykh robotov. M.: Nauka, 1990. 147 p.
6. **Kuzin Yu. R., Noskov A. V., Noskov V. P.** Razrabotka i issledovanie STZ dlya obespecheniya avtonomnogo dvizheniya. *Nauch.-tekh. sb. "Oboronnaya tekhnika"*. M.: NTTs "Informtekhnika", 2001. P. 34–39.
7. **Noskov V. P., Noskov A. V.** Navigatsiya mobil'nykh robotov po darnometricheskim izobrazheniyam. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2005. N. 12. P. 16–21.
8. **Noskov V. P., Rubtsov I. V., Romanov A. Yu.** Formirovanie ob'edinennoy modeli vneshney sredy na osnove informatsii videokamery i dal'nomera. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2007. N. 8. P. 2–5.
9. **Bylow E., Sturm J., Kerl C, Kahl F., Cremers D.** Real-Time Camera Tracking and 3D Reconstruction Using Signed Distance Functions. *Robotics: Science and Systems Conference (RSS)*, 2013.

УДК 623.64:623.74

**И. О. Жаринов**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, зав. кафедрой, igor\_rabota@pisem.net,  
**Ю. А. Кирсанова**<sup>2</sup>, нач. отдела, julakirsan@yandex.ru,

**П. В. Коновалов**<sup>1</sup>, аспирант, olkesomewhere@gmail.com, **М. О. Костишин**<sup>1</sup>, аспирант, job.max@me.com,

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (НИУ ИТМО),

<sup>2</sup>Санкт-Петербургское ОКБ "Электроавтоматика" имени П. А. Ефимова

## Алгоритм формирования и вывода картографических изображений в системах навигации пилотируемых летательных аппаратов

*Рассматривается оригинальный алгоритм формирования и автоматического изменения индикационного кадра картографического изображения, выводимого на экран бортовых средств индикации, для различных режимов пилотирования летательного аппарата. Приведена блок-схема алгоритма.*

**Ключевые слова:** навигация, картография, бортовые системы, геоинформационный ресурс

### Введение

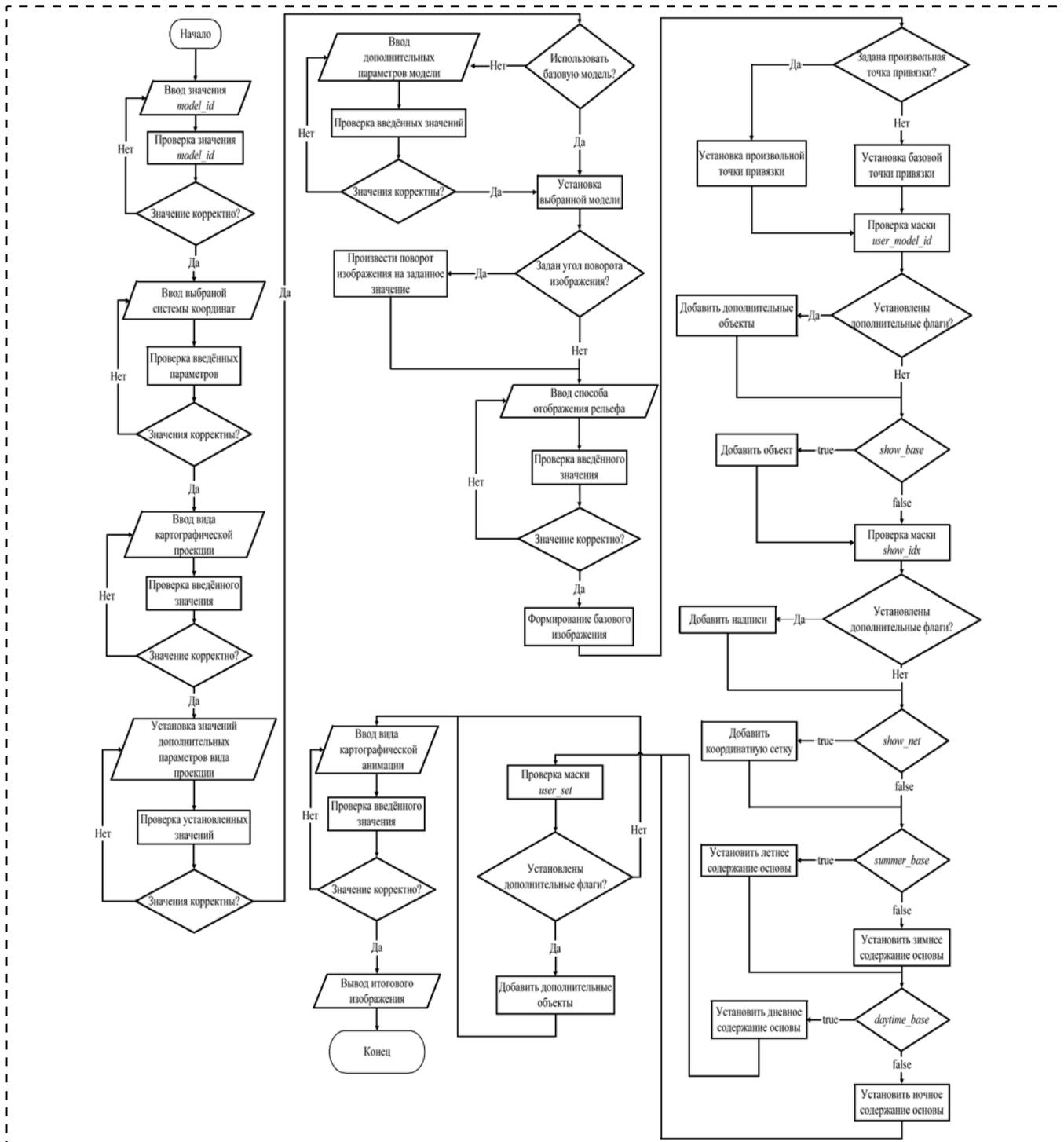
Наиболее информативный вид навигационных кадров, отображаемых системой индикации, — карта рельефа местности. На данный момент существующие реализации [1–9] позволяют визуализировать на борту летательного аппарата схематическое изображение, которое несмотря на ряд преимуществ не дает наглядного представления о подстилающей (земной) поверхности и повышает вероятность создания аварийной ситуации при по-

лизировать на борту летательного аппарата схематическое изображение, которое несмотря на ряд преимуществ не дает наглядного представления о подстилающей (земной) поверхности и повышает вероятность создания аварийной ситуации при по-

летах, особенно в условиях плохой видимости. Помимо информационной составляющей важную роль играет элемент утомляемости пилотов летательного аппарата. Общая усталость органов восприятия человека, развивающаяся в процессе полета, приводит к снижению концентрации внимания пилота, что, в свою очередь, увеличивает вероятность создания авиационного происшествия.

Для повышения безопасности и надежности полетов летательных аппаратов необходимо реализо-

вать на борту функцию визуализации изображения [10—13], которая будет совмещать наглядное графическое изображение и пилотажно-навигационную, метеорадиолокационную и другие виды информации. Такой метод совмещения изображений даст возможность осуществлять пилотирование "вслепую", полагаясь только на результаты измерений навигационных приборов. Это позволит значительно снизить риски при перелетах в условиях плохой видимости (при плохих метеоусловиях и



Алгоритм формирования и вывода на средства индикации геоинформационных данных

т. п.). Кроме того, наглядное отображение карты местности снижает информационную нагрузку на экипаж и обеспечивает возможность сохранения необходимой концентрации внимания пилотов на весь период полета.

### 1. Алгоритм автоматического изменения индикационного кадра картографического изображения

Реализация функции вывода карты местности включает решение следующих задач:

- автоматическое предупреждение экипажа об угрозах столкновения с естественными и искусственными наземными препятствиями, входа самолета в опасные и запретные зоны полетов, о незапланированном пересечении воздушных трасс и местных воздушных линий;
- повышение ситуационной осведомленности экипажа за счет наглядного представления навигационной обстановки на экране средства бортовой индикации в виде фрагментов картографических изображений местности;
- сокращение времени и повышение надежности распознавания летчиком навигационных объектов на радиолокационных изображениях местности за счет автоматического выделения на них ландшафтообразующих естественных и искусственных объектов местности, а также неконтрастных и находящихся в зонах затенения объектов местности.

Для выполнения функции вывода карты местности программное обеспечение бортовой системы картографической информации реализует алгоритм (см. рисунок), обеспечивающий формирование индикационного кадра и его вывод на экран бортовых средств отображения. Параметры изображения настраивает оператор бортового оборудования перед вылетом, и они могут быть скорректированы пилотом в процессе перелета. Выполняются следующие шаги алгоритма:

1. Выбирается для отображения требуемая цифровая модель местности из базы геопространственных данных по списку моделей, доступных в бортовой базе данных. Указатели на модели хранятся в массиве *model\_ids*, для каждой модели на экран выводится ее название, хранящееся в переменной *model\_ids[i].display\_name*.

2. Выбирается система координат аналогично выбору модели местности, однако вместо названий для наглядности на экран выводятся основные параметры выбираемой системы координат: *plane\_X*, *plane\_Y* — начальные координаты системы отсчета; *X\_count*, *Y\_count* — число квадратов вдоль каждой из осей; *pixel\_size* — размер пикселя.

3. Выбирается вид и параметры картографической проекции: сначала осуществляется выбор вида картографической проекции из доступных, по-

сле чего оказывается доступной настройка дополнительных параметров, набор которых меняется в зависимости от вида проекции.

4. Выбирается основной или один из производных масштабов отображения данных цифровой модели местности: основной масштаб устанавливается выбором делителя, в результате чего устанавливается значение переменной *scale\_factor*, после чего появляется возможность задать производный масштаб, в результате чего устанавливаются флаги битовой маски *derived\_scale\_factor*.

5. Задается путем ручного ввода произвольный угол ориентирования (поворота) картографического изображения.

6. Задается путем ручного ввода координат произвольная точка привязки картографического изображения.

7. Выбирается состав отображаемых элементов (слоев), в результате устанавливаются флаги в битовой маске *used\_model\_id*.

8. Выбирается из списка доступных способ отображения рельефа.

9. Включается или выключается отображение географической основы картографических изображений (крупных географических объектов), в результате устанавливается булево значение *show\_base*.

10. Включается или выключается индикация надписей, относящихся к отображаемым объектам различных категорий значимости, в результате устанавливаются флаги в битовой маске *show\_idx*.

11. Включается или выключается индикация координатных сеток, в результате устанавливается булево значение *show\_net*.

12. Выбирается "летнее" или "зимнее" содержание географической основы картографических изображений ("летнее" содержание включает объекты, визуально наблюдаемые в полете летом, "зимнее" — зимой), в результате происходит установка значения флага *summer\_base*. Значение *false* приводит к выводу зимней основы, значение *true* — к выводу летней.

13. Выбирается "дневное" или "ночное" содержание географической основы картографических изображений ("дневное" содержание включает объекты, визуально наблюдаемые в светлое время суток, "ночное" — в темное), в результате происходит установка значения флага *daytime\_base*. Значение *false* приводит к отображению ночной основы карты местности, значение *true* — дневной основы.

14. Включаются или выключаются пользовательские настройки карты (управление отображением некоторых объектов в соответствии с исключениями из правил, заданными для них при подготовке цифровой модели местности), в результате происходит установка флагов битовой маски *user\_settings*.

15. Выбирается из списка доступных заданный вид картографической анимации.

## 2. Функции бортовой системы с алгоритмом автоматического изменения индикационного кадра картографического изображения

Для облегчения управления летательным аппаратом автоматизирован выбор параметров картографического изображения в зависимости от изменения условий полета. Реализованы следующие функции:

- автоматический выбор из базы геопространственных данных модели местности, однозначно удовлетворяющей текущим требованиям к карте (накрывающей район полета и соответствующей по масштабу реализуемому этапу: руление, взлет, выход на исходный пункт маршрута, маршрут, применение, заход на посадку, посадка, и режиму: высота и скорость);
- автоматический выбор наиболее подходящей цифровой модели местности из имеющихся (накрывающей район полета и близкой к требуемой по масштабу), а также выбор масштабов ее отображения; при отсутствии в базе геопространственных данных цифровой модели, однозначно удовлетворяющей текущим требованиям к карте для реализуемого этапа и режима полета;
- автоматический выбор при масштабировании картографических изображений состава отображаемых объектов с учетом заданных при подготовке цифровой модели местности параметров отбора объектов, отличающихся для различных районов в зависимости от населенности и густоты речной сети.

Выбор осуществляется на основе анализа данных, значения которых устанавливаются пилотом вручную (этап и режим полета), данных, получаемых от бортовых приборов и в результате вычислений, проводимых бортовым оборудованием. В результате устанавливаются параметры, определяющие содержимое выводимого изображения. Дополнительно осуществляются:

- автоматический выбор "летней" или "зимней" карты местности в зависимости от текущего сезона (по текущей дате) — устанавливается соответствующее булево значение;
- автоматический выбор "дневной" или "ночной" карты в зависимости от текущих условий естественного освещения (по текущему времени с учетом даты и координат места самолета) — устанавливается соответствующее булево значение.

### Заключение

В процессе исследования авторами разработан алгоритм автоматического изменения индикационного кадра картографического изображения, выводимого на экран бортовых средств индикации, для различных режимов пилотирования летательного аппарата. Алгоритм позволяет определять число и наполнение слоев массива геоинформационных данных и выводить на средства индикации объем информации, соответствующий особенностям эргономического восприятия экипажа летательного аппарата.

Программное обеспечение, написанное на языке программирования С, реализует описанный набор функций и алгоритм и используется в качестве рабочей программы бортовой системы картографической информации, разработанной в ФГУП "Санкт-Петербургское ОКБ "Электроавтоматика" им. П. А. Ефимова".

### Список литературы

1. **Бабак В. П., Быков В. Н., Виноградов Ю. Н., Ильченко Ю. А., Парамонов П. П., Суслов В. Д., Сухомлинов Д. В., Уткин Б. В., Юшинский Ю. Т.** Устройство синтеза картографических изображений. Патент на полезную модель № 2250182 С1RU, МПК G06F 1/00. № 2004121191/11. Заявл. 13.07. 2004. Опубл. 20.04.2005.
2. **Жаринов И. О., Жаринов О. О.** Бортовые системы картографической информации. Принципы построения геоинформационных ресурсов: учеб. пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. 48 с.
3. **Парамонов П. П., Коновалов П. В., Жаринов И. О., Кирсанова Ю. А., Уткин С. Б.** Реализация структуры данных, используемых при формировании индикационного кадра в бортовых системах картографической информации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2 (84). С. 165—167.
4. **Парамонов П. П., Ильченко Ю. А., Жаринов И. О., Тарасов П. Ю.** Структурный анализ и синтез графических изображений на экранах современных средств бортовой индикации на плоских жидкокристаллических панелях // Авиакосмическое приборостроение. 2004. № 5. С. 50—57.
5. **Жаринов И. О., Коновалов П. В.** Классификация структуры данных, используемых при отображении геоинформационных ресурсов в бортовых системах картографической информации // Сборник трудов молодых ученых, аспирантов и студентов научно-педагогической школы кафедры ПБКС "Информационная безопасность, проектирование и технология элементов и узлов компьютерных систем" / Под ред. Ю. А. Гатчина. СПб: НИУ ИТМО, 2013. Ч. 1. С. 118—121.
6. **Парамонов П. П., Ильченко Ю. А., Жаринов И. О.** Теория и практика статистического анализа картографических изображений в системах навигации пилотируемых летательных аппаратов // Датчики и системы. 2001. № 8. С. 15—19.
7. **Копорский Н. С., Видин Б. В., Жаринов И. О.** Система бортовой картографической информации пилотируемых летательных аппаратов. Основные принципы построения // Сборник трудов 10-й междунар. конф. "Теория и технология программирования и защиты информации". СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. С. 18—23.
8. **Парамонов П. П., Костишин М. О., Жаринов И. О., Нечаев В. А., Сударчиков С. А.** Принцип формирования и отображения массива геоинформационных данных на экран средств бортовой индикации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 6. С. 136—142.
9. **Костишин М. О., Жаринов И. О., Жаринов О. О., Нечаев В. А., Суслов В. Д.** Оценка точности визуализации местоположения объекта в геоинформационных системах и системах индикации навигационных комплексов пилотируемых летательных аппаратов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 1.
10. **Kostishin M. O., Zharinov I. O.** Precision characteristics of the positioning of objects in aircraft geoinformation systems // Automation & Control: Proc. of the International Conference of Young Scientists "ISCAC-2013" (21—22 November, 2013). Saint Petersburg, National Research University Saint-Petersburg State Polytechnical University, 2013. P. 92—96.
11. **Жаринов И. О., Жаринов О. О.** Бортовые средства отображения информации на плоских жидкокристаллических панелях: учеб. пособие // Информационно-управляющие системы. СПб: ГУАП, 2005. 144 с.
12. **Копорский Н. С., Видин Б. В., Жаринов И. О.** Бортовые средства отображения информации современных пилотируемых летательных аппаратов // Современные технологии / Под ред. С. А. Козлова и В. Л. Ткалич. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 154—165.
13. **Парамонов П. П., Копорский Н. С., Видин Б. В., Жаринов И. О.** Многофункциональные индикаторы на плоских жидкокристаллических панелях: наукоемкие аппаратно-программные решения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2004. № 3 (14). С. 238—245.

I. O. Zharinov<sup>1</sup>, Professor, igor\_rabota@pisem.net,  
Ju. A. Kirsanova<sup>2</sup>, Chef of scientists-research department, juliakirsan@yandex.ru,  
P. V. Konovalov<sup>1</sup>, Postgraduate, olkesomewhere@gmail.com,  
M. O. Kostishin<sup>1</sup>, Postgraduate, job.max@me.com,

<sup>1</sup>Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics,  
<sup>2</sup>SPb Scientific Design Bureau "Electroavtomatika" by P. A. Efimova

## The Algorithm for Generating and Outputting the Image Map Navigation Systems Manned Aircraft

*In this article, the authors consider how to display the navigation frames displayed onboard vehicle display aircraft. Existing methods for displaying navigation information enable you to visualize on board the aircraft schematic view which gives a pictorial representation of the earth's surface, is detailed enough and increases the likelihood of an emergency during flight, in the conditions of the mountainous terrain in poor visibility and low altitude. To improve the safety and reliability of the aircraft, the authors propose to implement bot features imaging, which will combine visual and graphic images (flight and navigation, meteorological radar) and other types of information. Just a visual display area maps reduces crew workload information and provides the ability to maintain the necessary concentration of pilots to fly during the flight.*

*An algorithm for automatic change of the indicator chart picture frame, depending on various conditions. This algorithm allows the number of layers and filling array of geospatial data and displayed on the display means the amount of information corresponding to the characteristics of ergonomic perception crew of the aircraft.*

**Keywords:** navigation, cartography, on-board systems, geographic information resource

### References

1. Babak V. P., Bykov V. N., Vinogradov Yu. N., Il'chenko Yu. A., Paramonov P. P., Suslov V. D., Sukhomlinov D. V., Utkin B. V., Yushinskiy Yu. T. Ustroystvo sinteza kartograficheskikh izobrazheniy. Patent na poleznuyu model' № 2250182 S1RU, MPK G06F 1/00. № 2004121191711. Zayavl. 13.07.2004. Opubl. 20.04.2005.
2. Zharinov I. O., Zharinov O. O. Bortovye sistemy kartograficheskoy informatsii. Printsipy postroeniya geoinformatsionnykh resursov: ucheb. posobie. SPb: SPbGU ITMO, 2008. 48 p.
3. Paramonov P. P., Konovalov P. V., Zharinov I. O., Kirsanova Yu. A., Utkin S. B. Realizatsiya struktury dannykh, ispol'zuemykh pri formirovaniy indikatsionnogo kadra v bortovykh sistemakh kartograficheskoy informatsii. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki*. 2013. N. 2 (84). P. 165—167.
4. Paramonov P. P., Il'chenko Yu. A., Zharinov I. O., Tarasov P. Yu. Strukturnyy analiz i sintez graficheskikh izobrazheniy na ekranakh sovremennykh sredstv bortovoy indikatsii na ploskikh zhidkokristallicheskikh panelyakh. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*. 2004. N. 5. P. 50—57.
5. Zharinov I. O., Konovalov P. V. Klassifikatsiya struktury dannykh, ispol'zuemykh pri otobrazhenii geoinformatsionnykh resursov v bortovykh sistemakh kartograficheskoy informatsii. *Sbornik trudov molodykh uchenykh, aspirantov i studentov nauchno-pedagogicheskoy shkoly kafedry PBKS "Informatsionnaya bezopasnost', proektirovaniye i tekhnologiya elementov i uzlov komp'yuternykh sistem"*. Pod red. Yu. A. Gatchina. SPb: NIU ITMO, 2013. Part 1. P. 118—121.
6. Paramonov P. P., Il'chenko Yu. A., Zharinov I. O. Teoriya i praktika statisticheskogo analiza kartograficheskikh izobrazheniy v sistemakh navigatsii pilotiruemykh letatel'nykh apparatov. *Datchiki i sistemy*. 2001. N. 8. P. 15—19.
7. Koperskiy N. S., Vidin B. V., Zharinov I. O. Sistema bortovoy kartograficheskoy informatsii pilotiruemykh letatel'nykh apparatov. Osnovnye printsipy postroeniya. *Sbornik trudov 10-y mezhdunar. konf. "Teoriya i tekhnologiya programmirovaniya i zashchity informatsii"*. SPb: SPbGU ITMO, 2006. P. 18—23.
8. Paramonov P. P., Kostishin M. O., Zharinov I. O., Nechaev V. A., Sudarchikov S. A. Printsipy formirovaniya i otobrazheniya massiva geoinformatsionnykh dannykh na ekran sredstv bortovoy indikatsii. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki*. 2013. N. 6. P. 136—142.
9. Kostishin M. O., Zharinov I. O., Zharinov O. O., Nechaev V. A., Suslov V. D. Otsenka tochnosti vizualizatsii mestopolozheniya ob'ekta v geoinformatsionnykh sistemakh i sistemakh indikatsii navigatsionnykh kompleksov pilotiruemykh letatel'nykh apparatov. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki*. 2014. N. 1.
10. Kostishin M. O., Zharinov I. O. Precision characteristics of the positioning of objects in aircraft geoinformation systems. *Automation & Control: Proc. of the International Conference of Young Scientists "TSCAC-2013" (21-22 November, 2013)*. Saint Petersburg, National Research University Saint-Petersburg State Polytechnical University, 2013. P. 92—96.
11. Zharinov I. O., Zharinov O. O. Bortovye sredstva otobrazheniya informatsii na ploskikh zhidkokristallicheskikh panelyakh: ucheb. posobie. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*. SPb: GUAP, 2005. 144 p.
12. Koperskiy N. S., Vidin B. V., Zharinov I. O. Bortovye sredstva otobrazheniya informatsii sovremennykh pilotiruemykh letatel'nykh apparatov. *Sovremennyye tekhnologii*. Pod red. S. A. Kozlova i V. L. Tkach. SPb: SPbGU ITMO, 2004. PS. 154—165.
13. Paramonov P. P., Koperskiy N. S., Vidin B. V., Zharinov I. O. Mnogofunktsional'nye indikatory na ploskikh zhidkokristallicheskikh panelyakh: naukoemkie apparatno-programmnye resheniya. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki*. 2004. N. 3 (14). P. 238—245.

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: (499) 269-5397, тел./факс: (499) 269-5510

Дизайнер Т. Н. Погорелова.

Технический редактор Е. В. Конова. Корректор Е. В. Комиссарова.

Сдано в набор 02.06.2014. Подписано в печать 07.07.2014. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН814. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций  
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".  
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.