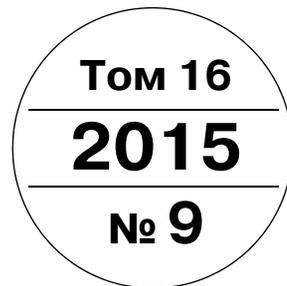


МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ



Издается с 2000 года

ISSN 1684-6427

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Редакционный совет:

CHYI-YEU LIN, PhD, prof.
GROUMPOS P. P., prof.
JEN-HWA GUO, PhD, prof.
KATALINIC B., PhD, prof.
SUBUDHI 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.
ЕРМОЛОВ И. Л., д. т. н., доц.
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. н., 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 АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Гурарий М. М., Жаров М. М., Русаков С. Г., Ульянов С. Л., Ходош Л. С.** Эффективный алгоритм реализации метода векторной аппроксимации в задачах идентификации передаточных функций динамических систем 579
- Каляев А. И., Каляев И. А.** Метод децентрализованного управления распределенной системой при выполнении потока заданий 585

ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Корсун О. Н., Габдрахманов А. Ш., Михайлов Е. И., Нахаев М. З., Тулебкаева А. К.** Алгоритм автоматического распознавания речевых команд, инвариантный к изменению языка 599
- Смеюха А. В., Федунев Б. Е.** Математическое моделирование процесса решения тактических задач экипажем антропоцентрического объекта 604

НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

- Потапов В. И.** Задачи и численные алгоритмы оптимизации надежности аппаратно-избыточной технической системы в конфликтной ситуации при различных стратегиях защиты от атак противника 617

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМАХ

- Герман-Галкин С. Г., Бормотов А. В.** Аналитическое и модельное исследование модульной синхронной реактивной машины в системе электропривода 625
- Земцов Н. С., Французова Г. А.** Синтез ПИД регулятора для системы управления прямоточным котлом 631

НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

- Алешкин В. В., Плотников П. К.** Экспериментальное подтверждение снижения погрешностей блока гироскопических измерителей угловой скорости за счет алгоритмической компенсации 637
- Чувашева Е. С., Чувашев С. Н.** Об эффективности применения изобарических режимов на гиперзвуковых летательных аппаратах 642

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора 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

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL



МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Published since 2000

ISSN 1684-6427

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Editorial Council:

ALIEV T. A., prof., Azerbaijan, Baku
 ANSHAKOV G. P., Russia, Samara
 BOLOTNIK N. N., Russia, Moscow
 CHENTSOV A. G., Russia, Ekaterinburg
 CHERNOUSKO F. L., Russia, Moscow
 CHYI-YEU LIN, PhD, Prof., Taiwan, Taipei
 FEDOROV I. B., Russia, Moscow
 GROUMPOS P. P., prof., Greece, Patras
 JEN-HWA GUO, PhD, Prof., Taiwan, Taipei
 KALYAEV I. A., Russia, Taganrog
 KATALINIC B., PhD, Prof., Austria, Vienna
 KRASNEVSKIY L. G., Belarus, Minsk
 KUZNETSOV N. A., Russia, Moscow
 LEONOV G. A., Russia, S.-Peterburg
 MATVEENKO A. M., Russia, Moscow
 MIKRIN E. A., Russia, Moscow
 PESHEKHONOV V. G., Russia, S.-Peterburg
 REZCHIKOV A. F., Russia, Saratov
 SCHERBATYUK A. F., Russia, Vladivostok
 SEBRYAKOV G. G., Russia, Moscow
 SIGOV A. S., Russia, Moscow
 SOJFER V. A., Russia, Samara
 SOLOMENTSEV Yu. M., Russia, Moscow
 SOLOVJEV V. A., Russia, Moscow
 SUBUDHI B., PhD, Prof., India, Sundargarh
 VASILYEV S.N., Russia, Moscow
 YUSUPOV R. M., Russia, S.-Peterburg

Editor-in-Chief:

FILIMONOV N. B., Russia, Moscow

Deputy Editor-in-Chief:

PODURAEV Yu. V., Russia, Moscow
 PUTOV V. V., Russia, S.-Peterburg
 YUSCHENKO A. S., Russia, Moscow

Responsible Secretary:

BEZMEENOVA M. Yu., Russia, Moscow

Editorial Board:

ALEXANDROV V. V., Russia, Moscow
 ANTONOV B. I., Russia, Moscow
 ARSHANSKY M. M., Russia, Tver
 BUKOV V. N., Russia, Zhukovsky
 ERMOLOV I. L., Russia, Moscow
 FILARETOV V. F., Russia, Vladivostok
 FRADKOV A. L., Russia, S.-Peterburg
 FURSOV V. A., Russia, Samara
 GRADETSKY V. G., Russia, Moscow
 ILYASOV B. G., Russia, Ufa
 IVCHENKO V. D., Russia, Moscow
 KOLOSOV O. S., Russia, Moscow
 KOROSTELEV V. F., Russia, Vladimir
 LEBEDEV G. N., Russia, Moscow
 LOKHIN V. M., Russia, Moscow
 PAVLOVSKY V. E., Russia, Moscow
 PROKHOROV N. L., Russia, Moscow
 PSHIKHOPOV V. Kh., Russia, S.-Peterburg
 RAPOPORT E. Ya., Russia, Samara
 SERGEEV S. F., Russia, S.-Peterburg
 VITTIKH V. A., Russia, Samara
 YUREVICH E. I., Russia, S.-Peterburg

Editorial Staff:

GRIGORIN-RYABOVA E.V., Russia, Moscow

The mission of the Journal is to cover the current state, trends and prospective development of *mechatronics*, that is the priority field in the technosphere as it combines mechanics, electronics, automatics and informatics in order to improve manufacturing processes and to develop new generations of equipment. Covers topical issues of development, creation, implementation and operation of mechatronic systems and technologies in the production sector, power economy and in transport.

CONTENTS

METHODS OF THE THEORY OF AUTOMATIC CONTROL

- Gourary M. M., Zharov M. M., Rusakov S. G., Ulyanov S. L., Khodosh L. S.** An Effective Algorithm for Realization of the Vector Fitting Method for the Identification Tasks of the Dynamical Systems 579
- Kalyaev A. I., Kalyaev I. A.** Method of Decentralized Control of the Distributed System during Execution of the Task Flow 585

ERGATIC CONTROL SYSTEMS

- Korsun O. N., Gabdrakhmanov A. Sh., Mihajlov E. I., Nahaev M. Z., Tulekbaeva A. K.** Algorithm for an Automatic Recognition of the Speech Commands, Invariant to Languages . . 599
- Smeyukha A. V., Fedunov B. E.** Mathematical Modeling of the Process for Solving of the Tactical Tasks by a Crew of an Anthropocentric Object 604

RELIABILITY OF TECHNICAL SYSTEMS

- Potapov V. I.** Tasks and Numerical Algorithms for Optimization of Reliability of the Hardware-Redundant Technical Systems in a Conflict Situation under Different Strategies for Protection Against Enemy Attacks 617

SIMULATION AND CONTROL IN THE MECHATRONIC SYSTEMS

- German-Galkin S. G., Bormotov A. V.** Analytical and Model Study of a Modular Switched Reluctance Machine in an Electric Drive System 625
- Zemtsov N. S., Frantsuzova G. A.** Design of PID-Controller for a Once-Through Boiler . . . 631

AIRCRAFT NAVIGATION AND CONTROL

- Aleshkin V. V., Plotnikov P. K.** Experimental Confirmation of Reduction of Unit GEUS Errors Due to an Algorithmic Compensation 637
- Chuvashева E. S., Chuvashев S. N.** On Efficiency of Application of Isobaric Modes for Hypersonic Vehicles 642

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

М. М. Гурарий, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., gourary@ippm.ru,
М. М. Жаров, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., zarov@ippm.ru,
С. Г. Русаков, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, гл. науч. сотр., rusakov@ippm.ru,
С. Л. Ульянов, д-р техн. наук, зав. отд., ulyas@ippm.ru,
Л. С. Ходощ, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., khod@ippm.ru,
Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, Москва

Эффективный алгоритм реализации метода векторной аппроксимации в задачах идентификации передаточных функций динамических систем

Предлагается новый алгоритм для решения линейной системы в рамках известного метода векторной аппроксимации (Vector Fitting), ориентированного на формирование рациональной передаточной функции линейной динамической системы. Алгоритм основан на использовании особенностей структуры матрицы метода векторной аппроксимации при ее QR-разложении. Проведенные численные эксперименты подтвердили существенное сокращение вычислительных затрат. Кроме того, показано, что новый алгоритм обеспечивает улучшение точности и требует существенно меньше памяти по сравнению со стандартным подходом.

Ключевые слова: векторная аппроксимация, макромодел, метод наименьших квадратов, передаточная функция, решение линейных систем, разреженная матрица, частотная характеристика

Введение

В настоящее время для моделирования многополюсных линейных блоков современных электронных систем широко используются макромоделли в виде рациональных передаточных функций (ПФ). Такой вид имеет известные преимущества по сравнению с другими формами макромоделей. Для обеспечения достаточной точности моделирования параметры рациональных функций определяются на основе оценок частотных характеристик объекта, полученных из физических экспериментов или анализа полной модели. Это требует эффективных алгоритмов аппроксимации параметров макромоделли.

Для разработки алгоритмов такой аппроксимации были известны различные вычислительные подходы (см., например, работы [1, 2]). Среди этих подходов в последнее время широкое распространение получил [3] метод векторной аппроксимации (ВА), который зарекомендовал себя как один из наиболее надежных и эффективных. Метод ВА был внедрен его разработчиком Б. Густавсеном в пакет MATLAB [4] (см. <https://www.sintef.no/projectweb/vecfit/>).

Обзор работ по методу ВА приводится в статье [5], а применение метода для редуцирования конечномерных линейных динамических моделей рассмотрено в работе [6]. Сравнение ВА с другими подходами к рациональной аппроксимации частотной ПФ выполнен в статье [7]. В отечественной литературе примеры использования ВА можно найти в работах [8–11].

Однако использование этого метода часто приводит к недопустимо высоким вычислительным затратам, которые в основном определяются затратами на решение линейной системы уравнений. В данной работе предлагается новый алгоритм решения линейной системы в рамках метода ВА. Ускорение и повышенная точность предложенного алгоритма достигаются за счет учета особенностей структуры матрицы метода ВА.

1. Особенности метода векторной аппроксимации

Метод ВА [3] является в настоящее время одним из наиболее популярных методов для аппроксимации экспериментальных или смоделированных значений векторной ПФ рациональными функциями.

Общая формулировка задачи рациональной аппроксимации векторной ПФ состоит в следующем. Динамическая система характеризуется множеством частотных ПФ $f_n(s)$, ($n = 1, 2, \dots, N_{TF}$) между входами/выходами системы. Требуется на основе известных значений $f_n(s_k)$ найти рациональные функции вида

$$\varphi_n(s) = \frac{N_n(s)}{D_n(s)} = \frac{\sum_{m=0}^{M+1} a_{nm}s^m}{\sum_{m=0}^M b_m s^m}, \quad (1)$$

аппроксимирующие функции $f_n(s)$: $f_n(s_k) \approx \varphi_n(s_k)$.

Здесь точки отбора $s_k \in S$ — комплексные частоты (лапласовские переменные), в которых получены (измерены в физических экспериментах или вычислены с помощью моделирования) значения ПФ для исходной системы. $N(s)$, $D(s)$ в соотношении (1) — это полиномы числителя и знаменателя, действительные коэффициенты которых должны быть определены при решении задачи аппроксимации. Следует отметить, что коэффициенты знаменателя (b_m) предполагаются не зависящими от индекса n , что соответствует стандартным условиям для всех ПФ одной динамической системы.

Известны различные подходы к решению указанной задачи. Прямой метод минимизации ошибки вида $\|N(S)/D(S) - f(S)\|_2 \rightarrow \min$ требует разработки сложных высокочастотных алгоритмов из-за нелинейной зависимости критерия от коэффициентов знаменателя. Формулировка задачи в линейном виде $\|N(S) - f(S)D(S)\|_2 \rightarrow \min$ приводит к решению плохо обусловленной линейной системы, что ограничивает применимость такого подхода малыми значениями порядка полиномов [3]. Для исключения указанных ограничений был разработан метод ВА [3], который предлагает достаточно простой и надежный алгоритм решения задачи рациональной аппроксимации в широком диапазоне частот.

В методе ВА искомая рациональная функция (1) представляется в форме элементарных дробей в лапласовской области:

$$\varphi_n(s) = \sum_{m=1}^M \frac{r_{mn}}{s-p_m} + d_n + sh_n. \quad (2)$$

Метод ВА является итерационным методом. Для проведения итераций вводится вспомогательная рациональная функция (σ -функция)

$$\sigma(s) = \sum_{m=1}^M \frac{\tilde{r}_m}{s-p_m} + 1 \quad (3)$$

с неизвестными вычетами \tilde{r}_m .

На каждой итерации находится решение базовой переопределенной линейной системы

$$\left(\sum_{m=1}^M \frac{\tilde{r}_m}{s_k - p_m} + 1 \right) f_n(s_k) = \sum_{m=1}^M \frac{r_m}{s_k - p_m} + d_n + s_k h_n \quad (4)$$

методом наименьших квадратов (НК) относительно r_{mn} , d_n , h_n , \tilde{r}_m .

После решения системы (4) новые значения полюсов (p_m^{NEW}) для следующей итерации находятся как нули σ -функции (3):

$$\sigma(p^{NEW}) = 0. \quad (5)$$

В этой статье мы рассматриваем наиболее частый случай, когда для каждой точки отбора s_k значения $f_n(s_k)$ определены для всех n . При этом размерность матрицы системы (2) определена как $N_s \times (M + N_{TF}(M + 2))$, где $N_s = N_{TF} \times N_f$ — это

общее число точек отбора во всех функциях (N_f — число частотных точек).

Применение метода ВА к высокоразмерным задачам встречает трудности из-за быстрого роста вычислительных затрат при решении системы (4) стандартными алгоритмами пакета MATLAB для разреженных матриц. В этой статье мы предлагаем специализированный алгоритм для снижения указанных затрат. Снижение достигается за счет учета специфики структуры линейной системы (4). Приведенные в статье результаты вычислительных экспериментов подтверждают эффективность и повышенную точность предложенного алгоритма.

2. Структура базовой линейной системы метода векторной аппроксимации

Базовую систему (4) можно представить в матричном виде:

$$Ax = b, \text{ где } x = \begin{bmatrix} x_F \\ x_\sigma \end{bmatrix}, \quad (6)$$

x_F — вектор вычетов ПФ, включающий значения r_{mn} , d_n , h_n , а x_σ — вектор вычетов σ -функции (значения \tilde{r}_m).

Система (6) — это переопределенная линейная система, решение которой соответствует решению задачи метода НК:

$$\|Ax - b\|_2 \rightarrow \min.$$

Стандартный метод ее решения, используемый в [3], состоит из следующих шагов.

Шаг 1. QR-разложение (разложение методом ортогонализации [12]) матрицы A , т. е. представление исходной прямоугольной матрицы в виде

$$A = QR, \quad (7)$$

где Q — ортогональная матрица, а R — верхняя треугольная матрица.

Шаг 2. Решение системы с верхней треугольной матрицей R :

$$Rx = Q^T b, \quad (8)$$

где верхний индекс "т" означает транспонирование.

Эффективность стандартного подхода (7), (8) можно повысить, учитывая структуру матрицы A в уравнении (6):

$$A = [A_F, A_\sigma], \quad (9)$$

где матрица A_F размерностью $N_s \times N_f(M + 2)$ имеет блочно-диагональную форму с N_{TF} идентичными блоками a размером $N_f(M + 2)$ каждый:

$$A_F = \begin{bmatrix} a & & & \\ & a & & \\ & & \dots & \\ & & & a \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где элементы блока a имеют вид:

$$a_{km} = \frac{1}{s_k - p_m} \text{ при } m \leq N_p, \quad a_{k, N_p} = a_{k, N_p + 1} = 1.$$

Благодаря такому виду матрицы A_F QR-разложение ($A_F = Q_F R_F$) может быть легко выполнено путем разложения одного блока $a = qr$, учитывая, что

$$Q_F = \begin{bmatrix} q & & & \\ & q & & \\ & & \dots & \\ & & & q \end{bmatrix}, \quad R_F = \begin{bmatrix} r & & & \\ & r & & \\ & & \dots & \\ & & & r \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Матрица A_σ в представлении (9) и вектор b в уравнении (6) являются плотными структурами, которые также можно представить в следующей блочной форме, имеющей N_f строк в каждом блоке:

$$A_\sigma = \begin{bmatrix} A^{(1)} \\ A^{(2)} \\ \dots \\ A^{(n)} \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} b^{(1)} \\ b^{(2)} \\ \dots \\ b^{(n)} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где векторные компоненты $A^{(n)}, b^{(n)}$ состоят из скалярных величин вида

$$A_{km}^{(i)} = \frac{f_i(s_k)}{s_k - p_m}, \quad b_k^{(i)} = f_i(s_k), \quad i = \overline{1, n}.$$

3. Алгоритм решения базовой системы метода векторной аппроксимации

Учитывая структуру матриц (9), (10) базовой системы (6) метода ВА, можно предложить вместо (7), (8) следующий алгоритм.

Алгоритм с простой ортогонализацией (в скобках для каждого шага приводятся поблочные операции)

Ш1. Выполнить QR-разложение матрицы A_F (10), выполнив QR-разложение одного матричного блока a :

$$a = qr. \quad (13)$$

Ш2. Провести ортогонализацию матрицы A_σ относительно Q_F :

$$H = Q_F^T A_\sigma \quad (H^{(n)} = q^T A^{(n)}).$$

Конечным результатом ортогонализации является блочная матрица B_σ , состоящая из матриц $B^{(n)}$:

$$B_\sigma = A_\sigma - Q_F^T H \quad (B^{(n)} = A^{(n)} - q^T H^{(n)}).$$

Ш3. Выполнить QR-разложение матрицы B_σ :

$$B_\sigma = Q_\sigma R_\sigma. \quad (14)$$

Ш4. Решить систему с верхней треугольной матрицей:

$$R_\sigma x_\sigma = b_\sigma,$$

где $b_\sigma = Q_\sigma^T b$.

Для выполнения итераций (3), (5) метода ВА достаточно знать вектор $x_\sigma = r_m$, поэтому после шага **Ш4** итерацию можно завершить. Если требуется полное решение, то следует выполнить еще шаг:

Ш5. Определить вектор x_F , получив правую часть

$$b_F = Q_F^T b - H x_\sigma \quad (b_F^{(n)} = q^T b^{(n)} - H^{(n)} x_\sigma)$$

и решив линейную систему

$$x_F = R_F^{-1} b_F \quad (x_F^{(n)} = r^{-1} b_F^{(n)}).$$

Вычислительные эксперименты показали плохие численные свойства приведенного алгоритма из-за недостаточной точности процесса ортогонализации на шаге **Ш2**. При абсолютно точном выполнении арифметических операций ортогонализация должна обеспечить нулевые значения всех элементов матрицы $Q_F^T Q_\sigma$. На самом деле значения элементов этой матрицы заметно отличны от нуля, особенно при высоких порядках системы. Для подавления этого эффекта можно применить повторную ортогонализацию, которая существенно снижает значения элементов матрицы $Q_F^T Q_\sigma$. Это видно из табл. 1, где приведены результаты численных экспериментов, показывающие снижение максимального элемента матрицы произведения с $0,351$ до $3,3 \cdot 10^{-17}$ за счет повторной ортогонализации. Для экспериментов была использована аппроксимирующая ПФ с порядком знаменателя $M = 20$.

Таблица 1
Значение максимального по модулю элемента матрицы $Q_F^T Q_\sigma$ в зависимости от порядка системы

Порядок системы	Простая ортогонализация	Повторная ортогонализация	Снижение ошибки
4	$3,44 \cdot 10^{-15}$	$6,09 \cdot 10^{-17}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$
12	$6,54 \cdot 10^{-7}$	$6,78 \cdot 10^{-18}$	$1,0 \cdot 10^{-11}$
20	$3,51 \cdot 10^{-1}$	$3,30 \cdot 10^{-16}$	$9,4 \cdot 10^{-16}$

Поэтому в алгоритм была включена повторная ортогонализация, после чего он принял вид, представленный ниже.

Алгоритм с повторной ортогонализацией

Первые три шага (Ш1—Ш3) совпадают с соответствующими шагами алгоритма с простой ортогонализацией.

Ш4. Ортогонализация матрицы Q_S относительно матрицы Q_F :

$$\bar{H} = Q_F^T Q_S, \bar{B}_\sigma = Q_S - Q_F \bar{H}.$$

Ш5. QR-разложение матрицы \bar{B}_σ :

$$\bar{B}_\sigma = \bar{Q}_\sigma \bar{R}_\sigma.$$

Ш6. Вычисление новой верхней треугольной матрицы:

$$\hat{R}_\sigma = \bar{R}_\sigma \bar{H}.$$

Ш7. Решение верхней треугольной системы:

$$\bar{b}_\sigma = Q_\sigma^T b, x_\sigma = \hat{R}_\sigma^{-1} \bar{b}_\sigma.$$

Ш8. Вычисление (необязательное) вектора x_F :

$$\bar{b}_F = Q_F^T b - (H + \bar{H} R_\sigma) x_\sigma, x_F = R_F^{-1} Q_F^T \bar{b}_F.$$

Как показали численные эксперименты, для плохо обусловленных матриц предложенный алгоритм генерирует нереалистичное решение, содержащее очень большие по модулю компоненты. Стандартный алгоритм для таких матриц генерирует решение, в котором соответствующие компоненты (число которых равно дефициту ранга матрицы) искусственно приравниваются к нулю. Для того чтобы обеспечить получение аналогичной структуры вектора решения в рамках предложенного алгоритма, QR-разложение (13), (14) следует применить к матрице с переставленными столбцами:

$$a(p) = qr, B_\sigma(p_\sigma) = Q_\sigma R_\sigma,$$

где p, p_σ — это векторы перестановок столбцов матрицы, обеспечивающие убывание диагональных элементов верхних треугольных матриц r, R_σ (определение векторов перестановок см. в работе [14]).

Тогда треугольная матрица усекается в соответствии с ее рангом, после чего компоненты решения, соответствующие отброшенной части, устанавливаются нулевыми.

4. Результаты численных экспериментов

Для вычислительных экспериментов использовали два набора данных:

- S -параметры длинной линии (коэффициенты, определяющие линейную связь между падающими и отраженными волнами на входе и выходе

линии), полученные с помощью электромагнитного моделирования. В этом случае системы метода НК соответствуют начальным значениям полюсов, которые вырождены в этих точках;

- искусственно сгенерированные значения ПФ с известными полюсами и вычетами, которые берутся в качестве начального приближения. В этом случае решение системы МНК соответствует истинным значениям полюсов, поэтому точное решение должно обеспечивать нулевую норму невязки. Системы являются невырожденными.

Результаты экспериментов представлены в табл. 2 и 3 для 200 значений частоты ($N_f = 200$) и разных размерностей ($N_p \times N_{TF}$). Приведены затраты процессорного времени и полученная норма невязки на одну итерацию. Результаты, полученные на основе стандартного алгоритма пакета MATLAB и нового алгоритма, показаны в графах "Стандартный" и "Новый" соответственно, а коэффициенты снижения уровня при использовании предложенного алгоритма показаны в графах " $K_{сн}$ ".

В табл. 2 приведены результаты для реального примера длинной линии. Видно, что для достаточно больших размеров системы НК предложенный алгоритм снижает затраты времени в несколько десятков раз. Превосходство предложенного алгоритма над стандартным возрастает с увеличением размера системы.

Для очень маленьких размерностей стандартный алгоритм обеспечивает меньшие затраты, чем предложенный метод, но это имеет место для случаев незначительных значений процессорного времени (менее 0,1 с), что на практике не играет существенной роли. Отметим, что алгоритм НК минимизирует норму невязки, поэтому меньшее значение нормы соответствует более высокой точности решения задачи. Таким образом, из табл. 2 можно заключить, что предложенный алгоритм обеспечивает лучшую точность расчетов.

Таблица 2

Сравнение алгоритмов по затратам времени и точности результатов для реального примера длинной линии

Размеры	Процессорное время			Норма невязки		
	Стандартный	Новый	$K_{сн}$	Стандартный	Новый	$K_{сн}$
10×5	0,01	0,04	0,25	2,02	1,45	1,39
10×10	0,611	0,09	6,79	3,33	2,28	1,46
10×25	3,38	0,541	6,25	6,45	5,52	1,17
20×5	0,371	0,09	4,12	3,52	3,24	1,09
20×10	1,56	0,170	9,19	5,60	5,06	1,10
20×25	20,5	0,511	40,0	1,26	1,19	1,06
40×5	0,972	0,221	4,39	6,97	6,83	1,02
40×10	4,89	0,431	11,3	10,9	0,426	25,6
40×25	68,8	1,513	45,0	25,8	1,19	21,6

Таблица 3

Сравнение алгоритмов по затратам времени и точности результатов для искусственно сгенерированных входных данных

Размеры	Процессорное время			Норма невязки		
	Стандартный	Новый	$K_{сн}$	Стандартный	Новый	$K_{сн}$
10×6	0,1	0,05	2,00	$2,4 \cdot 10^{-12}$	$9,1 \cdot 10^{-11}$	2,62
10×20	1,95	0,170	11,5	$6,8 \cdot 10^{-12}$	$2,1 \cdot 10^{-12}$	3,19
10×30	5,24	0,310	16,9	$1,7 \cdot 10^{-11}$	$4,3 \cdot 10^{-12}$	3,89
20×6	0,3	0,1	3,00	$1,1 \cdot 10^{-11}$	$3,4 \cdot 10^{-12}$	3,20
20×20	5,25	0,471	11,4	$6,0 \cdot 10^{-11}$	$8,0 \cdot 10^{-12}$	7,45
20×30	20,3	0,952	21,3	$1,1 \cdot 10^{-10}$	$8,9 \cdot 10^{-12}$	12,5
40×6	0,691	0,142	4,84	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$5,1 \cdot 10^{-12}$	2,98
40×20	21,4	1,0	21,4	$8,7 \cdot 10^{-11}$	$1,1 \cdot 10^{-12}$	7,97
40×30	96,8	1,513	45,0	$2,0 \cdot 10^{-10}$	$2,1 \cdot 10^{-11}$	9,52

В табл. 3 приведены результаты для примера со сгенерированными данными, которые также свидетельствуют о преимуществах предложенного алгоритма. Следует указать, что так как точная норма невязки в данном случае нулевая, то вычисленные значения нормы определяют погрешность алгоритма, которая снижается почти десятикратно при использовании предложенного метода.

Сравнения для более высоких размерностей системы не проводили из-за нехватки памяти при использовании пакета MATLAB для таких размерностей. Предложенный алгоритм позволял проводить расчеты для значительно больших размерностей, что указывает на существенное снижение требований к объему оперативной памяти.

Заключение

1. Особенности вида матрицы метода ВА (блоч-но-диагональная левая часть матрицы с идентичными блоками) позволяет предложить более эффективный алгоритм решения линейной системы МНК по сравнению со стандартным подходом.

2. Эффективность предложенного алгоритма обеспечивается за счет замены QR -разложения полной матрицы на последовательность блочных операций.

3. Экспериментально показано, что для обеспечения достаточной точности алгоритма требуется выполнить повторную ортогонализацию Q -матрицы правой части исходной матрицы.

4. Для того чтобы исключить появление нереалистичных решений с очень большими значениями в случае плохо обусловленной матрицы, необ-

ходимо выполнить перестановку столбцов и усечение матрицы с последующим заданием нулевых значений компонентов усеченной части.

5. Было выполнено тестирование разработанного алгоритма в сравнении со стандартным алгоритмом для двух наборов данных. Результаты тестирования показывают снижение процессорного времени в несколько десятков раз для достаточно больших размеров системы. В большинстве случаев предложенный алгоритм обеспечивает снижение нормы невязки по сравнению со стандартным алгоритмом, что свидетельствует о его лучшей точности. Превосходство предложенного алгоритма по сравнению со стандартным методом возрастает с увеличением размерности системы.

Список литературы

1. Coelho C. P., Phillips J. R., Silveira L. M. Robust rational function approximation algorithm for model generation // Proc. of the 36th Design Automation Conference. 1999. P. 207—212.
2. Gourary M. M., Rusakov S. G., Ulyanov S. L., Zharov M. M., Mulvaney B. J. An Optimum Fitting Algorithm for Generation of Reduced-Order Models // Proc. of the Asia and South Pacific Design Automation Conference, Yokohama. 2001. P. 209—213.
3. Gustavsen B., Semlyen A. Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting // IEEE Trans. Power Delivery. 1999. Vol. 14, N 3. P. 1052—1061.
4. Дьяконов В. MATLAB Полный самоучитель. ДМК Пресс, 2010. 768 с.
5. Lei C. U., Wang Y., Chen Q., Wong N. A decade of vector fitting development: applications on signal/power integrity // The American Institute of Physics, IAENG Trans. on Engineering Technologies. 2010. Vol. 1285. P. 435—449.
6. Heres P. J., Deschrijver D., Schilders W. H. A., Dhaene T. Combining Krylov subspace methods and identification-based methods for model order reduction // Int. J. of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields. 2007. Vol. 20, N 6. P. 271—282.
7. Annakkage U. D., Nair N. K. C., Liang Y., Gole A. M., Dinavahi V., Gustavsen B., Noda T., Ghasemi H., Monti A., Matar M., Irvani R., Martinez J. A. Dynamic System Equivalents: A Survey of Available Techniques // IEEE Transactions on Power Delivery. 2011. Vol. 27, N 1. P. 411—420.
8. Шевгунов Т. Я., Баев А. Б., Кузнецов Ю. В. Идентификация системы по известной частотной характеристике с использованием метода векторной аппроксимации // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2007. № 11. С. 55—59.
9. Щупаков А. С., Матвеев Д. А. Совершенствование методики расчета импульсных перенапряжений в обмотках силовых трансформаторов путем учета их частотных характеристик // ЭЛЕКТРО. 2010. № 1. С. 27—33.
10. Шевгунов Т. Я. Применение метода векторной аппроксимации в задачах параметрической идентификации линейных радиотехнических устройств // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2011. № 4. С. 45—49.
11. Горбунова А. А., Кузнецов Ю. В., Баев А. Б. Синтез эквивалентных электрических схем многопортовых СВЧ-структур // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. № 10. С. 34—39.
12. Воеводин В. В., Кузнецов Ю. А. Матрицы и вычисления. М.: Наука, 1984. 318 с.

An Effective Algorithm for Realization of the Vector Fitting Method for the Identification Tasks of the Dynamical Systems

M. M. Gourary, gourary@ippm.ru, **M. M. Zharov**, zarov@ippm.ru✉,
S. G. Rusakov, rusakov@ippm.ru, **S. L. Ulyanov**, ulyas@ippm.ru, **L. S. Khodosh**, khod@ippm.ru
Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (IPPM RAS),
Moscow, 124365, Russian Federation

Corresponding author: **Zharov Mikhail M.**, Ph. D., Leading Researcher,
Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (IPPM RAS),
Moscow, 124365, Russian Federation, e-mail: zarov@ippm.ru

Received on April 23, 2015

Accepted on May 15, 2015

A new algorithm for the least squares (LS) solutions within the Vector Fitting (VF) method is proposed in the paper. The algorithm is based on QR-factorization, which exploits the specific structure of the VF matrix. Numerical experiments confirmed an essential reduction of the computational efforts. Besides, the new algorithm ensures a better accuracy and requires considerably less memory than the standard Matlab sparse solver. The special form of LS matrix (left part of the matrix is block-diagonal with identical blocks) in VF problem allowed us to propose a more effective linear solver, than the standard one. The efficiency of the new algorithm is achieved due to replacement of the full matrix QR factorization by the following sequence of operations: QR factorization of the block; orthogonalization of the right part of the matrix with respect to the obtained block of Q matrix; QR factorization of the orthogonalized right part of the matrix. It was experimentally demonstrated that in order to ensure sufficient accuracy of the solver it was necessary to perform reorthogonalization of Q matrix of the right part of LS matrix and to perform QR factorizations with column permutation. Testing of the developed solver and its comparison with the standard solver was done for two data sets. The testing results showed that the new solver allowed us to reduce CPU time by the factor up to 50 for sufficiently large sizes of LS system. In most cases the new solver ensures less value of the residual norm than the standard solver and a better accuracy. The advantages of the new solver become even more impressive with an increase of the size of the system.

Keywords: vector-fitting, macromodel, least-squares method, transfer function, linear solver, sparse matrix, frequency response

For citation:

Gourary M. M., Zharov M. M., Rusakov S. G., Ulyanov S. L., Khodosh L. S. An Effective Algorithm for Realization of the Vector Fitting Method for the Identification Tasks of the Dynamical Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 9, pp. 579–584.

DOI: 10.17587/mau.16.579-584

References

1. **Coelho C. P., Phillips J. R., Silveira L. M.** Robust rational function approximation algorithm for model generation, *Proc. of the 36th Design Automation Conf.*, 1999, pp. 207–212.
2. **Gourary M. M., Rusakov S. G., Ulyanov S. L., Zharov M. M., Mulvaney B. J.** An Optimum Fitting Algorithm for Generation of Reduced-Order Models, *Proc. of the Asia and South Pacific Design Automation Conf*, Yokohama, 2001, pp. 209–213.
3. **Gustavsen B., Semlyen A.** Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting, *IEEE Trans. Power Delivery*, 1999, vol. 14, no. 3, pp. 1052–1061.
4. **D'jakonov V.** *MATLAB Polnyj samouchitel'* (MATLAB Full manual for self-tuition), DMK Press, 2010, 768 p. (in Russian).
5. **Lei C. U., Wang Y., Chen Q., Wong N.** A decade of vector fitting development: applications on signal/power integrity, *The American Institute of Physics, IAENG Trans. on Engineering Technologies*, 2010, vol. 1285, pp. 435–449.
6. **Heres P. J., Deschrijver D., Schilders W. H. A., Dhaene T.** Combining Krylov subspace methods and identification-based methods for model order reduction, *Int. J. of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 2007, vol. 20, no. 6, pp. 271–282.
7. **Annakkage U. D., Nair N. K. C., Liang Y., Gole A. M., Dinavahi V., Gustavsen B., Noda T., Ghasemi H., Monti A., Matar M., Iravani R., Martinez J. A.** Dynamic System Equivalents: A Survey of Available Techniques, *IEEE Trans. Power Delivery*, 2011, vol. 27, no. 1 pp. 411–420.
8. **Shevgunov T. Ja., Baev A. B., Kuznecov Ju. V.** *Identifikacija sistemy po izvestnoj chastotnoj harakteristike s ispol'zovaniem metoda vektornoj approksimacii* (Identification of the system with known frequency characteristic by Vector Fitting method), *Informacionno-Izmeritel'nye i Upravljajushchie Sistemy*, 2007, no. 11, pp. 55–59 (in Russian).
9. **Shhupakov A. S., Matveev D. A.** *Sovershenstvovanie metodiki raschjota impul'snyh perenaprjazhenij v obmotkah silovyh transformatorov putjom uchjota ih chastotnyh harakteristik* (Perfecting the computational technique of pulse overvoltage in windings of power transformers by accounting their frequency characteristics), *JeLEKTRO*, 2010, no. 1, pp. 27–33.
10. **Shevgunov T. Ja.** *Primenenie metoda vektornoj approksimacii v zadachah parametricheskoj identifikacii linejnyh radiotekhnicheskikh ustrojstv* (Application of Vector Fitting method in problems of parametric identifications of linear radiofrequency devices), *Radiotekhnicheskie i Telekommunikacionnye Sistemy*, 2011, no. 4, pp. 45–49 (in Russian).
11. **Gorbunova A. A., Kuznecov Ju. V., Baev A. B.** *Sintez jekvivalentnyh jelektricheskikh shem mnogoportovyh SVCh-struktur* (Synthesis of equivalent electric circuits of multiport SHF-structures), *Informacionno-Izmeritel'nye i Upravljajushchie Sistemy*, 2012, no. 10, pp. 34–39 (in Russian).
12. **Voevodin V. V., Kuznecov Ju. A.** *Matricy i vychislenija* (Matrices and Computations), Moscow, Nauka, 1984, 318 p. (in Russian).

А. И. Каляев, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., anatoly@kalyaev.net,
И. А. Каляев, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., директор, kaliaev@mvs.sfedu.ru,
 Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем
 имени академика А. В. Каляева Южного федерального университета, г. Таганрог

Метод децентрализованного управления распределенной системой при выполнении потока заданий

Рассматривается задача управления распределенной системой с сетевой архитектурой, состоящей из множества объектов, объединенных каналом связи и совместно участвующих в выполнении потока потребительских заданий. При этом полагается, что каждое потребительское задание состоит из набора связанных операций и может поступать в произвольный момент времени. Предлагается метод децентрализованного управления распределенной системой с помощью множества устройств управления отдельных объектов, входящих в ее состав. Приводятся алгоритмы функционирования устройств управления отдельных объектов распределенной системы для четырех вариантов исходной постановки задачи управления. В заключении приводятся результаты экспериментальных исследований предложенных алгоритмов на программной модели распределенной системы.

Ключевые слова: распределенная система, поток заданий, децентрализованное управление, сетевое планирование операций, автоматическое распределение

Введение

В настоящее время все большую актуальность приобретает проблема управления распределенными системами, состоящими из некоторого множества объектов (подсистем), совместно участвующих в выполнении общего задания, например, таких как: группа роботов, участвующих в сборочном производстве или выполняющих совместную боевую задачу; распределенные управляющие и вычислительные системы, состоящие из множества процессорных узлов, которые участвуют в совместном решении общей управленческой или вычислительной задачи; системы типа "умный дом" или "умный город", состоящие из множества датчиков и исполнительных устройств, совместно решающих задачи по обслуживанию дома или города [1, 2]. Данная проблема особенно актуальна в такой перспективной сфере, как микробототехника, когда каждый робот группы может осуществлять ограниченный набор простейших действий, и поэтому выполнение сложных заданий возможно только за счет их совместного, группового взаимодействия [3].

Основными преимуществами таких распределенных систем являются:

1. Сокращение времени выполнения задания вследствие возможности распараллеливания выполнения отдельных его операций между объектами, входящими в систему.

2. Повышение надежности и отказоустойчивости системы, поскольку выход из строя отдельного объекта, входящего в систему, не приводит к выходу из строя всей системы в целом, а задания, возложенные на данный объект, могут быть "перераспределены" между остальными объектами системы.

Однако управление такой распределенной системой, особенно в реальном масштабе времени, представляет достаточно сложную проблему. До недавнего времени эта проблема решалась посред-

ством специально выделенного центрального устройства управления (ЦУУ), функции которого заключаются в мониторинге текущего состояния всех объектов системы, распределении операций между ними при выполнении заданий, поступающих от потребителей, и формировании соответствующих команд управления для реализации этих операций (рис. 1).

Однако такая централизованная организация устройства управления распределенной системой имеет целый ряд недостатков. Во-первых, при большом числе объектов в системе мониторинг их текущего состояния, распределение операций и формирование команд управления из одного ЦУУ в реальном времени становится практически невозможным. Во-вторых, существенно затрудняется масштабирование системы (т. е. добавление в ее

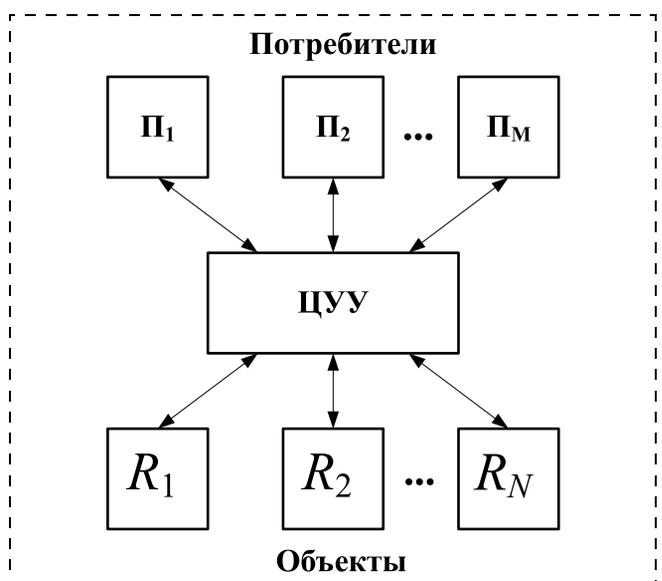


Рис. 1. Централизованное управление распределенной системой

состав новых объектов), поскольку при этом необходимо полностью менять не только программу работы ЦУУ, но и архитектуру его связей. И наконец, в-третьих, распределенная система с ЦУУ становится малонадежной, поскольку выход из строя ЦУУ приводит к выходу из строя всей системы в целом. Все перечисленные проблемы многократно усложняются в случае, когда распределенная система должна выполнять не одиночное задание, а поток потребительских заданий, поступающих в заранее неизвестные моменты времени.

Всех этих недостатков можно избежать, если использовать принципы децентрализованного (коллективного) управления распределенными системами [4, 5]. При этом предполагается, что каждый из объектов распределенной системы обладает своим индивидуальным устройством управления (УУ), а общая координация действий всех объектов, входящих в состав системы, при решении общей задачи осуществляется путем их коллективного взаимодействия посредством некоторого сетевого канала связи (рис. 2).

Использование принципов децентрализованного управления распределенной системой обеспечивает: во-первых, высокую отказоустойчивость системы, поскольку в ней отсутствует "узкое горло" в виде ЦУУ, а выход из строя любого из объектов не приводит к выходу из строя всей системы в целом; во-вторых, возможность практически неограниченного увеличения (масштабирования) числа объектов в системе путем их простого подключения к сетевому каналу связи и, наконец, в-третьих, снижение вычислительной нагрузки на УУ отдельного объекта, поскольку им решается только задача управления данным объектом, а не всей системой

в целом, что, в свою очередь, упрощает проблему обеспечения режима реального времени при управлении распределенной системой.

Однако, вместе с тем, использование этих принципов требует создание новых методов и алгоритмов управления распределенной системой. Именно разработке одного из таких методов посвящена данная статья.

1. Постановка задачи

Предположим, что в состав распределенной системы R входит N объектов R_1, R_2, \dots, R_N , каждый из которых может выполнять некоторый набор операций $A_i = \langle A_1^i, A_2^i, \dots, A_L^i \rangle$ ($i = 1, 2, \dots, N$), причем известно, что объект R_i выполняет операцию A_j^i за время $t_i(A_j^i)$ ($j = 1, 2, \dots, L$).

Будем считать, что система R должна выполнять некоторое множество (поток) различных заданий $Z = \langle Z_1, Z_2, \dots, Z_M \rangle$, которые могут поступать от различных потребителей в случайные моменты времени. При этом каждое задание $Z_l \in Z$ представляется в виде некоторого ациклического графа операций $G_l(Q_l, X_l)$ (рис. 3), вершине $q_j \in Q_l$ которого приписана некоторая операция A_j , принадлежащая

множеству $A = \bigcup_{i=1}^N A_i$, а дуга $x(q_j, q_{j+1})$ определяет, что результат операции A_j , приписанной вершине q_j , необходим для выполнения операции A_{j+1} , приписанной вершине q_{j+1} . Кроме того, потребитель ус-

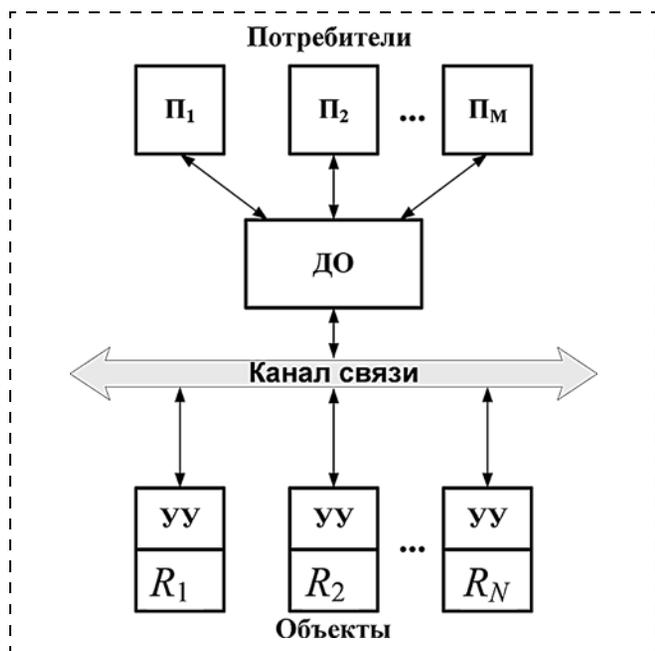


Рис. 2. Децентрализованное управление распределенной системой

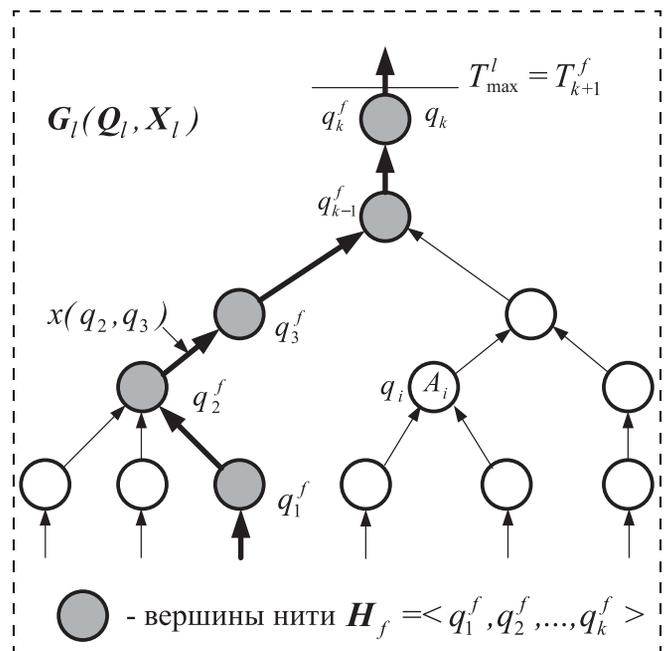


Рис. 3. Граф $G_l(Q_l, X_l)$ задания Z_l

танавливает требуемый момент времени T_{\max}^l , к которому он желает получить результат выполнения своего задания Z_l .

При этом возникает вопрос: каким образом и в каком виде распределенная система R должна получать задания от потребителей? При централизованной организации взаимодействие потребителей и объектов множества R осуществляется через ЦУУ (см. рис. 1). При децентрализованном управлении взаимодействие потребителей и объектов множества R может осуществляться посредством некоторого специально выделенного узла, подключенного к общему каналу связи и играющего роль "доски объявлений" (ДО), на которой потребитель может размещать свое задание (см. рис. 2).

Прежде чем разместить задание Z_l на ДО, потребитель должен представить его в некотором формализованном виде — в виде дескриптора. Дескриптор задания Z_l должен включать следующие данные:

- граф $G_l(Q, X)$ задания Z_l , представленный, например, в виде таблицы сложности;
- список вершин множества Q_l и приписанных им операций множества A ;
- момент времени T_{\max}^l , к которому задание должно быть выполнено;
- список объектов множества R , участвующих в выполнении данного задания (заполняется в процессе распределения операций).

Сформированный таким образом дескриптор задания Z_l размещается потребителем на ДО.

Цель работы распределенной системы R заключается в выполнении всех заданий потребителей, размещенных на ДО, к заданным моментам времени. При этом для выполнения каждого конкретного задания Z_l среди всего множества объектов R должно быть сформировано некоторое подмножество $R_l \subseteq R$, которое в дальнейшем будем называть сообществом по выполнению задания Z_l .

Очевидно, что проблема выполнения поставленного потребителем задания Z_l в распределенной системе R может быть решена в два этапа:

1. Сначала необходимо создать сообщество $R_l \subseteq R$ по выполнению данного задания Z_l и распределить операции, приписанные вершинам графа $G_l(Q, X)$, задания Z_l между объектами, входящими в это сообщество, таким образом, чтобы обеспечить выполнение всего задания к требуемому моменту времени T_{\max}^l . При этом под распределением (сетевым планированием) операций понимается закрепление операций, приписанных вершинам графа $G_l(Q, X)$ задания Z_l , за конкретными объектами, входящими в состав сообщества, с привязкой времени их выполнения к определенным моментам времени.

2. После того как операции задания Z_l распределены, каждый объект $R_j \subseteq R_l$ самостоятельно реализует закрепленные за ним операции, контролируя при этом временной график их выполнения.

Основную трудность при этом, очевидно, составляет задача первого этапа, а именно, распределения (сетевого планирования) операций между объектами системы. Проблеме распределения операций (сетевого планирования) между множеством объектов посвящено достаточно большое число исследований [6—8]. Поэтому, если графы $G_l(Q, X)$ ($l = 1, 2, \dots, M$) всех заданий множества Z известны и состав распределенной системы R не изменяется, то с помощью известных методов, в принципе, такие расписания могут быть составлены заранее для каждого из заданий множества $Z_l \in Z$ и могут просто храниться в памяти объектов R_i ($i = \overline{1, N}$).

Однако это идеализированный случай. В реальности графы операций выполняемых системой заданий $Z = \langle Z_1, Z_2, \dots, Z_M \rangle$ могут быть заранее неизвестны, а состав объектов, входящих в систему R , может изменяться непредсказуемым образом (например, некоторые из них могут выходить из строя). В этом случае возникает необходимость разработки метода автоматического распределения операций для всех объектов системы R при выполнении потока заранее неизвестных заданий Z с помощью множества их УУ.

В зависимости от конкретных условий данная задача может иметь четыре различных варианта постановки.

1. В простейшем варианте все объекты R_1, R_2, \dots, R_N системы R одинаковы и могут выполнять одинаковые наборы операций, т. е. $A_i = A_j$, ($i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, i - 1, i + 1, \dots, N$), причем операция $A_s \in A$ выполняется всеми объектами R_i ($i = 1, 2, \dots, N$) за одинаковое время, т. е. $t_i(A_s) = t_j(A_s)$ ($i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, i - 1, i + 1, \dots, N$).

2. В более сложном варианте наборы операций, выполняемых всеми объектами системы R , одинаковы, т. е. $A_i = A_j$ ($i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, i - 1, i + 1, \dots, N$), однако время выполнения идентичных операций $A_s \in A$ различными объектами $R_i \in R$ и $R_j \in R$ различно, т. е. $t_i(A_s) \neq t_j(A_s)$ ($i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, i - 1, i + 1, \dots, N$).

3. В третьем варианте наборы операций, выполняемых различными объектами системы R , также различны, т. е. $A_i \neq A_j$ ($i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, i - 1, i + 1, \dots, N$), хотя они могут и пересекаться, т. е. $A_i \cap A_j \neq \emptyset$. При этом время выполнения идентичных операций $A_s \in A$ для всех объектов R_i ($i = \overline{1, N}$) одинаковое, т. е. $t_i(A_s) = t_j(A_s)$ ($i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, i - 1, i + 1, \dots, N$).

4. Наконец, в самом сложном варианте объекты системы R выполняют различные наборы операций, т. е. $A_i \neq A_j$ и $A_i \cap A_j \neq \emptyset$, причем время выполнения идентичных операций $A_s \in A_i$ различными объектами $R_i \in R$ и $R_j \in R$ также различно, т. е. $t_i(A_s) \neq t_j(A_s)$ ($i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, i - 1, i + 1, \dots, N$).

Рассмотрим более подробно алгоритмы децентрализованного управления объектами распределенной системы R при выполнении потока зада-

ний Z , поступающих от различных потребителей в случайные моменты времени, для всех вариантов исходной постановки.

Вариант 1

Как показано выше, в данном варианте все объекты R_p ($p = 1, 2, \dots, N$) множества R совершенно идентичны, т. е. могут выполнять одинаковый набор операций $A = \langle A_1, A_2, \dots, A_L \rangle$ за одинаковое время $t_p(A_s)$ ($s = 1, 2, \dots, L$).

Прежде чем приступить к разработке алгоритма, введем понятие "нити". Под нитью будем понимать некоторую последовательность вершин $H_f = \langle q_1^f, q_2^f, \dots, q_k^f \rangle$ графа $G_l(Q_l, X_l)$ задания Z_l , в которой вершины q_j^f и q_{j+1}^f ($j = 1, 2, \dots, k-1$) соединены дугой $x(q_j^f, q_{j+1}^f)$ (рис. 3). Иными словами, нить определяет некоторую последовательность операций задания Z_l , в которой каждая последующая операция использует результат выполнения предыдущей операции. Очевидно, что операции, приписанные вершинам нити H_f , могут выполняться только последовательно. При этом под длиной t_f нити H_f будем понимать суммарное время, затрачиваемое на ее выполнение, т. е.

$$t_f = \sum_{i=1}^k (t_p(A_i) + t_{\Pi}(A_j, A_{j+1})),$$

где $t_p(A_i)$ — время, затрачиваемое объектом $R_p \in R$ на выполнение операции A_i , приписанной вершине $q_i^f \in H_f$ ($i = 1, 2, \dots, k$); $t_{\Pi}(A_i, A_{i+1})$ — время, затрачиваемое на передачу результатов операции A_i , выполняемой объектом $R_p \in R$, объекту $R_c \in R$, выполняющему следующую по очереди операцию A_{i+1} нити H_f ; $t_{\Pi}(A_k, A_{k+1})$ — время, затрачиваемое на передачу результата исполнения операции, приписанной последней вершине q_k^f нити H_f (т. е. результата исполнения всей нити H_f) либо потребителю, если q_k^f — конечная вершина графа $G_l(Q_l, X_l)$, т. е. $q_k^f = q_k$, либо объекту, исполняющему сопряженную нить (рис. 3).

Для упрощения дальнейших построений будем считать, что $t_{\Pi}(A_i, A_{i+1}) = 0$, если операции A_i и A_{i+1} выполняет один и тот же объект $R_f \in R$, и $t_{\Pi}(A_i, A_{i+1}) = t_{\Pi}$, если операции A_i и A_{i+1} выполняют различные объекты множеств R , либо A_{i_f} — операция, приписанная последней вершине q_k^f нити H_f .

Очевидно, что если все объекты множества R выполняют идентичные операции множества A за одинаковое время, то выполнение всех операций, приписанных вершинам нити H_f , целесообразно осуще-

ствлять с помощью одного и того же объекта $R_p \in R$. Действительно, в этом случае время $t_{\Pi}(A_i, A_{i+1})$, затрачиваемое на передачу результатов операций между вершинами нити H_f , будет равно нулю, и, соответственно, длина (время выполнения) нити будет минимальной, т. е.

$$t_f = \sum_{i=1}^k t_p(A_i) + t_{\Pi}, \quad (1)$$

где t_{Π} — время, затрачиваемое на передачу результата исполнения последней вершины нити H_f .

При этом, если требуемый момент времени T_{k+1}^f исполнения последней вершины q_k^f нити H_f известен (рис. 3), то, зная время $t_p(A_i)$ ($i = 1, 2, \dots, k$) выполнения отдельных операций, приписанных вершинам нити, можно определить требуемый момент времени начала выполнения операции A_d , приписанной любой вершине $q_d^f \in H_f$ ($d = 1, 2, \dots, k$), как

$$T_d^f = T_{k+1}^f - \left(\sum_{j=d}^k t_p(A_j) + t_{\Pi} \right). \quad (2)$$

Отметим, что при размещении задания Z_l на ДО требуемый момент времени исполнения, определяемый установленным потребителем временем T_{\max}^l выполнения всего задания Z_l , приписан только конечной вершине $q_k \in Q_l$ графа (рис. 3).

Исходя из этих соображений можно предложить следующую процедуру распределения (сетового планирования) операций между объектами системы R при выполнении потока заданий Z .

Объекты, не задействованные в выполнении каких-либо заданий, обращаются к ДО в поисках работы. Если объект $R_p \in R$ обнаруживает на ДО дескриптор задания Z_l , то он оценивает возможность своего участия в сообществе по его выполнению. Для этого объект R_p выделяет в графе $G_l(Q_l, X_l)$, хранящемся в дескрипторе задания Z_l , наиболее длинную нить $H_f = \langle q_1^f, q_2^f, \dots, q_k^f \rangle$ согласно выражению (1), конечной вершине которой приписан момент времени ее исполнения T_{k+1}^f . Последнее может быть осуществлено с помощью одного из известных алгоритмов поиска максимального пути на графе, например, волнового алгоритма [9]. Отметим, что изначально, в момент размещения дескриптора задания Z_l на ДО, таковой нитью является нить $H_1 = \langle q_1^1, q_2^1, \dots, q_k^1 \rangle$, которая начинается на одной из входных вершин графа, а заканчивается на выходной вершине графа $G_l(Q_l, X_l)$, т. е. $q_k^1 = q_k$ (рис. 3). Очевидно, что выполнение данной нити должно быть завершено к заданному потребителем

моменту T_{\max}^l выполнения всего задания Z_l в целом, который также содержится в ее дескрипторе, т. е. $T_{k+1}^1 = T_{\max}^l$.

На основании данных о времени $t_p(A_i)$ ($i = 1, 2, \dots, k$) выполнения отдельных операций, входящих в выделенную нить H_1 , объект R_p определяет согласно выражению (2) моменты времени, когда необходимо приступить к выполнению каждой из операций нити H_1 , чтобы успеть завершить исполнение всей нити к заданному моменту времени T_{k+1}^l , как

$$T_d^1 = T_{k+1}^1 - \left(\sum_{i=d}^k t_p(A_i) + t_{\Pi} \right), \quad (d = 1, 2, \dots, k).$$

Если при этом оказывается, что $T_1^1 < T_{\text{тек}}$, где $T_{\text{тек}}$ — текущий момент времени, T_1^1 — требуемый момент времени начала выполнения первой операции нити H_1 , то это означает, что объект R_p не может обеспечить выполнение всей последовательности операций нити $H_1 = \langle q_1^1, q_2^1, \dots, q_k^1 \rangle$ к заданному моменту времени T_{k+1}^1 . Поскольку в данном варианте постановки задачи мы приняли, что все объекты группы одинаковы и выполняют все идентичные операции за одинаковое время, то это также означает, что никакой другой объект множества R также не сможет выполнить данную нить к заданному моменту времени T_{k+1}^1 . Таким образом, задание Z_l не может быть выполнено, и поэтому оно снимается с ДО, а потребителю посылается сообщение о невозможности выполнения его задания за отведенное время. После этого объект R_p вновь переходит к опросу ДО в поисках работы.

Если же условие $T_1^1 \geq T_{\text{тек}}$ выполняется, то в этом случае объект R_p принимает на себя исполнение последовательности операций, приписанных вершинам нити H_1 . При этом объект R_p осуществляет модификацию дескриптора задания Z_l на ДО, а именно:

1) его номер p записывается в список членов сообщества по выполнению задания Z_i ;

2) вершины, входящие в нить H_1 , исключаются из графа $G_l(Q_l, X_l)$ (т. е. в таблице смежности удаляются соответствующие строки и столбцы), в результате чего формируется новый граф $G_l^1(Q_l^1, X_l^1) = G_l(Q_l, X_l)/H_1$ (рис. 4);

3) всем вершинам графа $G_l^1(Q_l^1, X_l^1)$, инцидентным вершинам нити H_1 , приписываются требуемые моменты времени их исполнения, которые

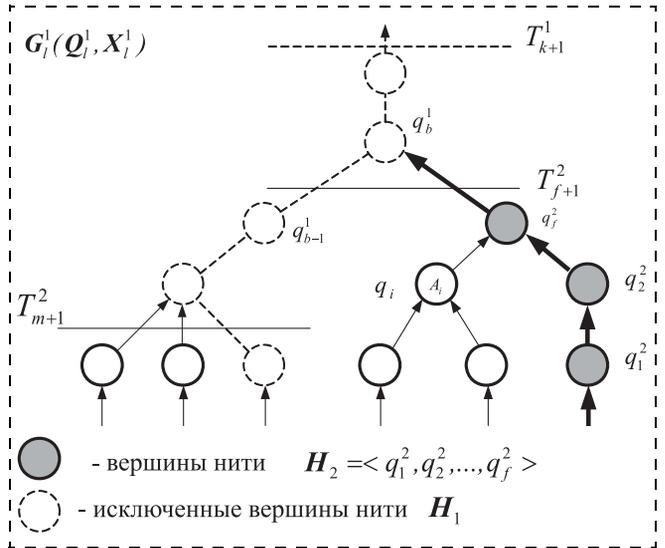


Рис. 4. Граф $G_l^1(Q_l^1, X_l^1)$ задания Z_l , модифицированный объектом R_p

определяются исходя из следующих соображений. Допустим, что некоторая вершина q_f^2 графа $G_l^1(Q_l^1, X_l^1)$ инцидентна вершине q_b^1 , принадлежащей нити H_1 (рис. 4). Это означает, что для выполнения операции, приписанной вершине q_b^1 , необходимы результаты выполнения операции, приписанной вершине q_f^2 графа $G_l^1(Q_l^1, X_l^1)$. Поэтому очевидно, что результаты выполнения операции, приписанной вершине q_f^2 , должны быть получены и переданы объекту R_p , выполняющему операции нити H_1 , не позже, чем к требуемому моменту времени начала выполнения операции вершины q_b^1 , определяемому согласно выражению (2) как

$$T_b^1 = T_{k+1}^1 - \left(\sum_{i=b}^k t_p(A_i) + t_{\Pi} \right). \quad (3)$$

В противном случае объект R_p не успеет закончить исполнение взятой на себя нити H_1 к требуемому моменту времени $T_{k+1}^1 = T_{\max}^l$.

Поэтому вершине q_f^2 графа $G_l^1(Q_l^1, X_l^1)$ приписывается требуемое время ее исполнения $T_{f+1}^2 = T_b^1$, а также номер объекта R_p , которому результаты исполнения операции q_f^2 должны быть переданы.

Аналогичным образом определяются требуемые моменты T_{m+1}^2 исполнения всех остальных вер-

шин графа $G_l^1(Q_l^1, X_l^1)$, инцидентных вершинам нити H_1 (рис. 4).

Если после модификации новый граф $G_l^1(Q_l^1, X_l^1)$ задания Z_l еще не пустой, т. е. $G_l^1(Q_l^1, X_l^1) \neq \emptyset$, то процесс создания сообщества для выполнения задания Z_l продолжается далее. Допустим, что через какое-то время другой свободный объект R_c обнаруживает на ДО дескриптор задания Z_l . Объект R_p делает попытку войти в состав сообщества по исполнению данного задания. Для этого объект R_c выделяет в графе $G_l^1(Q_l^1, X_l^1)$ (который остался в дескрипторе задания Z_l после модификации, проведенной объектом R_p) наиболее длинную нить $H_2 = \langle q_1^2, q_2^2, \dots, q_f^2 \rangle$ (рис. 4) конечной вершине q_f^2 , которой приписано требуемое время исполнения T_{f+1}^2 , и определяет согласно выражению (2) момент времени, когда необходимо приступить к ее выполнению, как

$$T_1^2 = T_{f+1}^2 - \left(\sum_{i=1}^f t_c(A_i) + t_{\Pi} \right),$$

где T_{f+1}^2 — момент времени, приписанный конечной вершине q_f^2 нити H_2 .

Если $T_1^2 < T_{\text{тек}}$, где $T_{\text{тек}}$ — текущий момент времени, то это означает, что данная нить и соответственно все задание Z_l в целом не могут быть выполнены к требуемому моменту времени. Поэтому задание Z_l снимается с ДО, потребителю направляется сообщение о невозможности выполнения

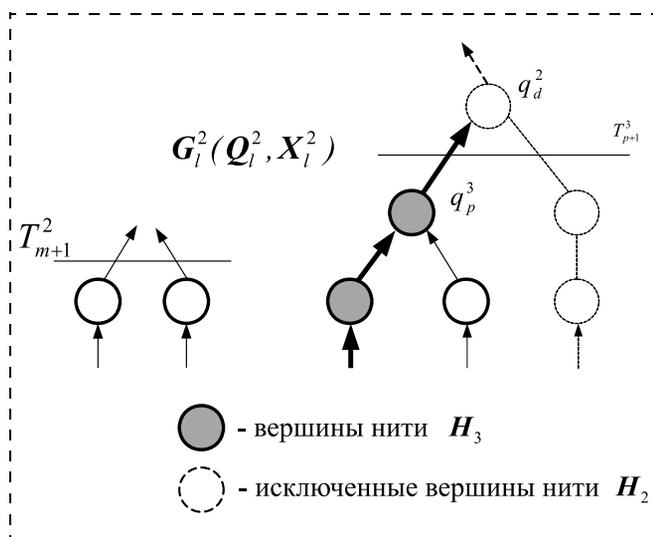


Рис. 5. Граф $G_l^2(Q_l^2, X_l^2)$ задания Z_l , модифицированный объектом R_c

его задания Z_l , а всем объектам, вошедшим ранее в сообщество по его выполнению (номера которых хранятся в дескрипторе задания), сообщается об остановке данного задания, после чего они снова переходят в режим опроса ДО в поисках работы.

В случае же, если $T_1^2 \geq T_{\text{тек}}$, объект R_c принимает на себя исполнение операций, приписанных вершинам данной нити H_2 , и осуществляет очередную модификацию дескриптора задания Z_l на ДО:

- номер объекта R_c записывается в список членов сообщества по выполнению данного задания;
- вершины, входящие в нить H_2 , исключаются из графа $G_l^1(Q_l^1, X_l^1)$, в результате чего образуется новый граф $G_l^2(Q_l^2, X_l^2)$ (рис. 5);
- вершинам q_p^3 графа $G_l^2(Q_l^2, X_l^2)$, инцидентным вершинам q_d^2 нити H_2 , приписывается требуемое время их исполнения (рис. 5), определяемое как

$$T_{p+1}^3 = T_{f+1}^2 - \left(\sum_{i=d}^f t_c(A_i) + t_{\Pi} \right),$$

а также номер объекта R_c , которому результаты исполнения этих операций должны быть направлены.

Далее в процесс распределения операций задания Z_l включается следующий свободный объект множества R , обнаруживший его дескриптор на ДО, и так до тех пор, пока не окажется, что граф $G_l^j(Q_l^j, X_l^j)$ стал пустым, что означает, что все операции задания Z_l разобраны объектами, вошедшими в сообщество по его выполнению.

После того как некоторый объект R_p выбрал для исполнения нить $H_f = \langle q_1^f, q_2^f, \dots, q_k^f \rangle$, он приступает к реализации операций, приписанных ее вершинам. При этом перед началом выполнения очередной операции A_i , приписанной вершине $q_i^f \in H_f$ ($i = 1, 2, \dots, k$), он должен проверить соблюдение временного графика выполнения последовательности операций нити H_f . Для этого он сравнивает требуемое время начала выполнения операции, приписанной вершине $q_d^f \in H_f$, определяемое как

$$T_d^f = T_{k+1}^f - \left(\sum_{i=d}^k t_p(A_i) + t_{\Pi} \right),$$

где T_{k+1}^f — время, приписанное последней вершине q_k^f нити H_f , с текущим временем $T_{\text{тек}}$.

Если $T_j^f < T_{\text{тек}}$, то это означает, что объект R_p уже не успевает выполнить оставшиеся операции

нити H_f к требуемому моменту времени T_{k+1}^f , т. е. он по каким-то причинам не выполнил в запланированное время предыдущие операции нити H_f и, тем самым, "отстал" от графика выполнения нити H_f , что, в свою очередь, ведет к "срыву" графика выполнения всего задания Z_l в целом. В этом случае задание Z_l снимается с ДО, потребителю направляется сообщение о невозможности его выполнения к заданному моменту времени, а всем объектам, вошедшим в сообщество по его выполнению, направляется сообщение об остановке данного задания, после чего они переходят в режим поиска задания на ДО.

Описанному выше процессу отвечает следующий укрупненный алгоритм функционирования устройства управления отдельного объекта, входящего в состав распределенной системы R .

Алгоритм 1.

1. Свободный объект R_p опрашивает ДО.
2. При обнаружении на ДО задания Z_l объект R_p считывает его дескриптор и анализирует граф задания $G_l^j(Q_l^j, X_l^j)$. Если $G_l^j(Q_l^j, X_l^j) = \emptyset$, то переход к п. 1, иначе
3. Объект R_p выделяет в графе $G_l^j(Q_l^j, X_l^j)$ наиболее длинную нить $H_j = \langle q_1^j, q_2^j, \dots, q_k^j \rangle$ согласно выражению (1), конечной вершине q_k^j которой приписано требуемое время ее исполнения T_{k+1}^j (если $H_j = H_1$, то $T_{k+1}^j = T_{\max}^l$), и определяет допустимый момент времени, когда необходимо начать ее выполнение, как

$$T_1^j = T_{k+1}^j - \left(\sum_{i=1}^k t_p(A_i) + t_{\Pi} \right).$$

4. Если $T_1^j < T_{\text{тек}}$, где $T_{\text{тек}}$ — текущий момент времени, то переход к 12, иначе
5. Объект R_p принимает на себя выполнение нити H_j , для чего модифицирует дескриптор задания Z_l на ДО: записывает в список участников сообщества R_l свой номер; модифицирует граф $G_l^j(Q_l^j, X_l^j)$ задания Z_l путем исключения из него вершин нити H_j , т. е. $G_l^{j+1}(Q_l^{j+1}, X_l^{j+1}) = G_l^j(Q_l^j, X_l^j) / H_j$; приписывает вершинам q_b^{j+1} модифицированного графа $G_l^{j+1}(Q_l^{j+1}, X_l^{j+1})$, инцидентным вершинам q_d^j

нити H_j , требуемое время исполнения, определяемое как

$$T_{b+1}^{j+1} = T_{k+1}^j - \left(\sum_{i=d}^k t_p(A_i) + t_{\Pi} \right), \quad (4)$$

а также номер объекта R_p , которому необходимо передать результаты исполнения вершины q_b^{j+1} .

6. Объект R_p переходит к исполнению последовательности операций, приписанных вершинам нити $H_j = \langle q_1^j, q_2^j, \dots, q_k^j \rangle$; $d = 1$.

7. Если $T_d^j < T_{\text{тек}}$, где $T_d^j = T_{k+1}^j - \left(\sum_{i=d}^k t_p(A_i) + t_{\Pi} \right)$ — требуемое время начала выполнения операции A_d , приписанной вершине $q_d^j \in H_j$, то перейти к 12, иначе

8. Объект R_p выполняет операцию A_d , приписанную вершине $q_d^j \in H_j$.

9. Если объекту R_p поступило сообщение о прекращении выполнения задания Z_l , то переход к 1, иначе

10. $d = d + 1$, если $d \leq k$, то переход к 7, иначе

11. После выполнения всех операций нити H_j номер объекта R_p исключается из списка членов сообщества по выполнению задания Z_l в его дескрипторе на ДО, а результат выполнения последней операции нити H_j передается объекту R_c , номер которого приписан последней вершине q_k^j нити H_j , или потребителю, если последняя вершина выполненной нити H_j — это конечная вершина графа $G_l(Q_l, X_l)$, т. е. $q_k^j = q_k$. При этом дескриптор задания Z_l удаляется с ДО. Переход к 1.

12. Задание Z_l не может быть выполнено. Дескриптор задания Z_l удаляется с ДО, потребителю направляется сообщение о невозможности выполнения его задания, а всем объектам, номера которых записаны в списке участников сообщества по выполнению задания Z_l , передается сообщение о прекращении его исполнения. Переход к 1.

Вариант 2

В отличие от первого варианта постановки задачи распределения операций потока заданий Z_l между объектами распределенной системы R , во втором варианте время выполнения идентичных операций различными объектами системы R также различно, т. е.

$$t_i(A_j) \neq t_j(A_i) \\ (i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, i - 1, i + 1, \dots, N).$$

При этом очевидно, что время выполнения одной и той же нити H_f различными объектами множества R также будет различным. Поэтому, если

окажется, что объект $R_p \in R$, первым обнаруживший задание Z_l на ДО, не может выполнить H_f к заданному моменту времени T_{\max}^l , то это вовсе не означает, что задание невыполнимо. Действительно, через какое-то время может появиться другой свободный объект $R_c \in R$, который сможет выполнить данную нить к требуемому моменту времени.

Поэтому после обнаружения задания Z_l на ДО объект R_p должен сначала согласно выражению (1) выделить наиболее длинную нить, конечной вершине которой приписано требуемое время выполнения, и оценить возможность ее исполнения к заданному моменту времени. Если это условие выполняется, то он принимает исполнение последовательности операций, приписанных данной нити, на себя. В противном случае он должен выделить в графе заданий следующую по длине нить, конечной вершине которой также приписано требуемое время ее исполнения, и проанализировать возможность ее исполнения к требуемому моменту времени и т. д. до тех пор, пока он не найдет нить, которую он может выполнить за отведенное время, либо безуспешно переберет все нити графа задания в порядке убывания их длины.

Следует отметить, что в момент размещения задания Z_l на ДО требуемый момент времени исполнения T_{\max}^l приписан только конечной вершине q_k графа $G_l(Q_l, X_l)$ (см. рис. 3). Поэтому процесс распределения операций этого задания не "сдвинется с места" до тех пор, пока не найдется объект, способный выполнить нить $H_1 = \langle q_1^1, q_2^1, \dots, q_k^1 \rangle$, заканчивающуюся на конечной вершине q_k , к моменту времени $T_{k+1}^1 = T_{\max}^l$.

После того как нить H_1 будет принята некоторым объектом R_p к исполнению и всем вершинам модифицированного графа $G_l^1(Q_l^1, X_l^1)$, инцидентным вершинам нити H_1 , будут приписаны требуемые моменты времени их исполнения (с помощью описанной выше процедуры), последующие объекты, обнаружившие задание на ДО, будут иметь уже возможность выбора среди некоторого множества тех нитей, для которых требуемое время их исполнения определено.

Процесс распределения задания Z_l должен заканчиваться, когда либо все нити графа $G_l(Q_l, X_l)$ разобраны объектами, вступившими в сообщество R_l по его исполнению, т. е. $G_l^j(Q_l^j, X_l^j) = \emptyset$, либо текущее время $T_{\text{тек}}$ превысит заданное время T_{\max}^l исполнения всего задания Z_l в целом.

Как только объект R_p принял к исполнению некоторую нить H_f , он приступает к выполнению последовательности операций, приписанных ее вершинам. При этом прежде чем приступить к выполнению

операции A_d , приписанной очередной вершине $q_d^f \in H_f$, он должен проверить соблюдение временного графика выполнения последовательности операций данной нити, т. е. сравнить текущее время $T_{\text{тек}}$ с требуемым временем начала выполнения операции A_d , определяемым как

$$T_d^f = T_{k+1}^f - \left(\sum_{i=d}^k t_p(A_i) + t_{\Pi} \right).$$

Если $T_d^f < T_{\text{тек}}$, то это означает, что план выполнения задания Z_l "сорван", после чего дальнейшее выполнение задания Z_l прекращается. В противном случае объект R_p приступает к выполнению операции A_d .

Исходя из приведенных выше соображений можно предложить следующий алгоритм функционирования отдельного объекта распределенной системы R в условиях, когда время выполнения идентичных операций различными объектами также различно.

Алгоритм 2.

1. Свободный объект R_p опрашивает ДО.
 2. При обнаружении на ДО задания Z_l объект R_p считывает его дескриптор и анализирует граф $G_l^j(Q_l^j, X_l^j)$. Если $G_l^j(Q_l^j, X_l^j) = \emptyset$, то переход к 1, иначе
 3. Если $T_{\text{тек}} \geq T_{\max}^l$, где $T_{\text{тек}}$ — текущий момент времени, то переход к 17, иначе
 4. $i = 1$; $G_i(Q_i, X_i) = G_l^j(Q_l^j, X_l^j)$.
 5. Объект R_p выделяет в графе $G_i(Q_i, X_i)$ наиболее длинную нить $H_i = \langle q_1^i, q_2^i, \dots, q_k^i \rangle$ согласно выражению (1), для конечной вершины q_k^i которой определено требуемое время исполнения T_{k+1}^i (если $H_i = H_1$, то $T_{k+1}^i = T_{\max}^l$), и определяет момент времени, когда он должен приступить к ее выполнению, как
- $$T_1^i = T_{k+1}^i - \left(\sum_{m=d}^k t_p(A_m) + t_{\Pi} \right).$$
6. Если $T_1^i \geq T_{\text{тек}}$, где $T_{\text{тек}}$ — текущий момент времени, то переход к 10, иначе
 7. Нить H_i исключается из графа $G_i(Q_i, X_i)$, т. е. $G_{i+1}(Q_{i+1}, X_{i+1}) = G_i(Q_i, X_i) / H_i$.
 8. Если $G_{i+1}(Q_{i+1}, X_{i+1}) = \emptyset$, то перейти к 1, иначе
 9. $i = i + 1$, перейти к 5.
 10. Объект R_p принимает на себя выполнение нити H_i , для чего модифицирует дескриптор задания Z_l : записывает в список участников сообщества R_l по

выполнению задания Z_l свой номер; модифицирует граф задания Z_l путем исключения из него вершин нити H_i , т. е. $G_l^{j+1}(Q_l^{j+1}, X_l^{j+1}) = G_l^j(Q_l^j, X_l^j)/H_i$; приписывает вершинам q_b^{j+1} модифицированного графа $G_l^{j+1}(Q_l^{j+1}, X_l^{j+1})$, инцидентным вершинам q_d^i нити H_i , требуемое время их исполнения, определяемое как

$$T_{b+1}^{j+1} = T_{k+1}^i - \left(\sum_{m=d}^k t_p(A_m) + t_{\Pi} \right),$$

а также номер объекта R_p , которому необходимо передать результаты исполнения вершины q_b^{j+1} .

11. Объект R_p переходит к исполнению последовательности операций, приписанных вершинам принятой к исполнению нити $H_i = \langle q_1^i, q_2^i, \dots, q_k^i \rangle$; $d = 1$.

12. Если $T_d^i < T_{\text{тек}}$, где $T_d^i = T_{k+1}^i - \left(\sum_{m=d}^k t_p(A_m) + t_{\Pi} \right)$ — требуемое время начала выполнения операции A_d , приписанной вершине $q_d^i \in H_i$, то перейти к 17, иначе

13. Объект R_p выполняет операцию A_d , приписанную вершине $q_d^i \in H_i$.

14. Если объекту R_p поступило сообщение о прекращении дальнейшего выполнения задания Z_l , то переход к 1, иначе

15. $d = d + 1$, если $d \leq k$, то перейти к 12, иначе

16. После выполнения всех операций нити H_i номер объекта R_p исключается из списка членов сообщества по выполнению задания Z_l в его дескрипторе на ДО, а результат выполнения последней операции нити H_i передается объекту R_c , номер которого приписан конечной вершине q_k^i нити H_i , или потребителю, если последняя вершина выполненной нити H_i — это конечная вершина графа $G_l(Q_l, X_l)$, т. е. $q_k^i = q_k$. В последнем случае дескриптор задания Z_l удаляется с ДО. Переход к 1.

17. Задание Z_l не может быть выполнено. Дескриптор задания Z_l удаляется с ДО, потребителю направляется сообщение о невозможности выполнения его задания, а всем объектам, номера которых записаны в списке участников сообщества по выполнению задания Z_l , сообщается о прекращении его исполнения. Переход к 1.

В этом варианте исходной постановки задачи предполагается, что объекты R_i ($i = 1, 2, \dots, N$) системы R выполняют различные наборы операций A_j , причем в общем случае $A_i \cap A_j \neq \emptyset$ ($i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, i - 1, i + 1, \dots, N$), однако время выполнения идентичных операций различными объектами одинаково.

Рассмотрим основные принципы организации процесса распределения (сетевого планирования) операций потока заданий Z среди множества объектов R при данных условиях.

Допустим, что некоторый свободный объект $R_p \in R$ обнаружил на ДО задание Z_l . В отличие от предыдущих вариантов исходной постановки в данном случае может оказаться, что объект R_p способен выполнять далеко не все операции, приписанные вершинам графа $G_l^j(Q_l^j, X_l^j)$ задания Z_l , хранящегося на ДО. Поэтому в графе $G_l^j(Q_l^j, X_l^j)$ необходимо предварительно выделить подграф $G_l^{jp}(Q_l^{jp}, X_l^{jp})$, вершинам которого приписаны операции множества A_p , выполняемые объектом R_p (рис. 6). После этого необходимо проанализировать, есть ли среди вершин графа $G_l^{jp}(Q_l^{jp}, X_l^{jp})$ вершины, которым приписано требуемое время их исполнения (при размещении задания Z_l на ДО требуемое время исполнения T_{max}^l приписано только конечной вершине q_k графа $G_l(Q_l, X_l)$). Если таковых

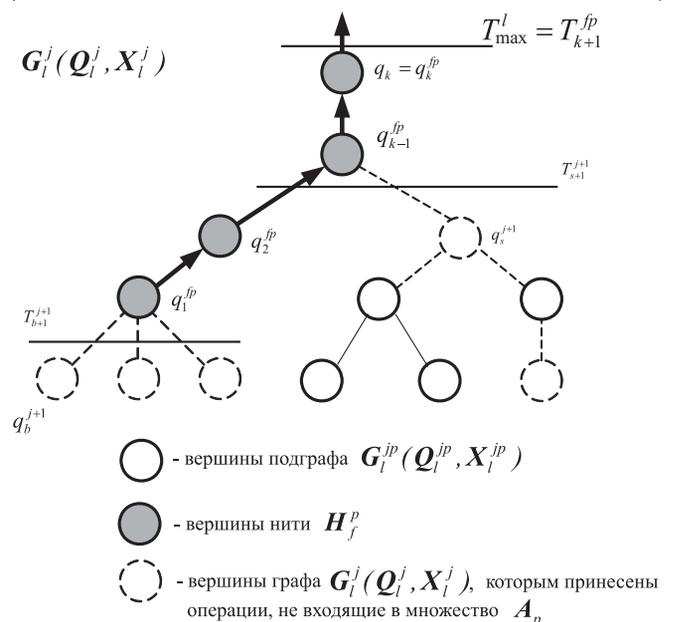


Рис. 6. Выделение подграфа $G_l^{jp}(Q_l^{jp}, X_l^{jp})$ в графе $G_l^j(Q_l^j, X_l^j)$ задания Z_l

вершин нет, то это говорит о том, что объект R_p пока что не может вступить в сообщество по выполнению задания Z_l , и поэтому он вновь переходит к режиму опроса ДО в целях поиска других заданий. В противном случае в графе $G_l^{jp}(\mathcal{Q}_l^{jp}, X_l^{jp})$ с помощью выражения (1) выделяется наиболее длинная нить $H_f^p = \langle q_1^{jp}, q_2^{jp}, \dots, q_k^{jp} \rangle$, конечной вершине q_k^{jp} которой приписано требуемое время исполнения T_{k+1}^f , и анализируется возможность ее исполнения объектом R_p к данному моменту времени (рис. 6). Для этого определяется требуемое время начала исполнения операции, приписанной первой вершине q_1^{jp} данной нити H_f^p , как

$$T_1^{fp} = T_{k+1}^f - \left(\sum_{i=1}^k t_p(A_i) + t_{\Pi} \right),$$

после чего оно сравнивается с текущим временем $T_{\text{тек}}$. Если $T_{\text{тек}} > T_1^{fp}$, то это означает, что объект R_p не может выполнить данную нить к требуемому моменту времени T_{k+1}^f . Поскольку в данном варианте принято, что все объекты множества R выполняют идентичные операции за одинаковое время, то это также означает, что никакой другой объект $R_c \in R$ также не может выполнить данную нить H_f^p к требуемому моменту времени, т. е. задание Z_l невыполнимо, и его дескриптор снимается с ДО. Иначе объект R_p входит в состав сообщества по выполнению задания Z_l , нить H_f^p исключается из графа $G_l^j(\mathcal{Q}_l^j, X_l^j)$, в результате чего формируется новый граф $G_l^{j+1}(\mathcal{Q}_l^{j+1}, X_l^{j+1}) = G_l^j(\mathcal{Q}_l^j, X_l^j) / H_f^p$, а вершинам графа $G_l^{j+1}(\mathcal{Q}_l^{j+1}, X_l^{j+1})$, инцидентным вершинам нити H_f^p , приписывается требуемое время их исполнения, определяемое согласно выражению (3), а также номер объекта R_p , которому должны быть переданы результаты исполнения приписанных им операций.

После этого объект R_p может приступить к выполнению операций, приписанных вершинам нити H_f^p . Однако поскольку поиск нити H_f^p осуществлялся в подграфе $G_l^{jp}(\mathcal{Q}_l^{jp}, X_l^{jp})$ графа $G_l^j(\mathcal{Q}_l^j, X_l^j)$, то может оказаться, что операция, приписанная первой вершине q_1^{jp} нити H_f^p , не может быть выполнена, поскольку она не является начальной вершиной

графа $G_l(\mathcal{Q}_l, X_l)$ задания Z_l , а для ее выполнения необходимы результаты операции смежной вершины q_b^{j+1} графа $G_l^{j+1}(\mathcal{Q}_l^{j+1}, X_l^{j+1})$ (рис. 6). В этом случае объект R_p должен перейти в режим ожидания получения результатов выполнения операции, приписанной вершине q_b^{j+1} , и только после этого приступить к выполнению операции нити H_f^p .

Процесс распределения операций задания Z_l должен заканчиваться в случае, если граф задания $G_l^{j+1}(\mathcal{Q}_l^{j+1}, X_l^{j+1})$ становится пустым (что означает, что все его операции распределены между объектами множества R) либо если текущее время $T_{\text{тек}}$ превышает установленное потребителем время T_{max}^l выполнения всего задания Z_l .

Исходя из приведенных выше соображений можно предложить следующий алгоритм работы устройства управления объекта R_p , входящего в состав системы R в условиях, когда наборы операций, выполняемых различными объектами, также различны, однако время выполнения ими идентичных операций одинаково.

Алгоритм 3.

1. Свободный объект R_p опрашивает ДО.
2. При обнаружении на ДО задания Z_l объект R_p считывает его дескриптор и анализирует граф задания $G_l^j(\mathcal{Q}_l^j, X_l^j)$. Если $G_l^j(\mathcal{Q}_l^j, X_l^j) = \emptyset$, то переход к 1, иначе 3.

В графе $G_l^j(\mathcal{Q}_l^j, X_l^j)$ выделяется подграф $G_l^{jp}(\mathcal{Q}_l^{jp}, X_l^{jp})$, вершинам которого приписаны операции множества A_p , выполняемые объектом R_p .

4. Если $G_l^{jp}(\mathcal{Q}_l^{jp}, X_l^{jp}) = \emptyset$ или ни одной из вершин графа $G_l^{jp}(\mathcal{Q}_l^{jp}, X_l^{jp})$ не приписано требуемое время T_{k+1}^j ее исполнения, то перейти к 1, иначе

5. Объект R_p выделяет в графе $G_l^{jp}(\mathcal{Q}_l^{jp}, X_l^{jp})$ наиболее длинную нить $H_j^p = \langle q_1^{jp}, q_2^{jp}, \dots, q_k^{jp} \rangle$, конечной вершине которой приписано требуемое время исполнения T_{k+1}^j (в момент размещения задания Z_l на ДО требуемое время $T_{k+1}^j = T_{\text{max}}^l$ приписано только конечной вершине q_k графа $G_l(\mathcal{Q}_l, X_l)$), и определяет допустимый момент времени, когда необходимо начать ее выполнение, как

$$T_1^{jp} = T_{k+1}^j - \left(\sum_{i=1}^k t_p(A_i) + t_{\Pi} \right),$$

где $t_p(A_i)$ — время, затрачиваемое объектом R_p на выполнение операции A_i , приписанной вершине q_i^{jp} ($i = 1, 2, \dots, k$) нити H_j^p .

6. Если $T_1^{jp} < T_{\text{тек}}$, где $T_{\text{тек}}$ — текущий момент времени, то переход к 15, иначе

7. Объект R_p принимает на себя исполнение нити H_j^p , для чего модифицирует дескриптор задания Z_i на ДО: в список участников сообщества записывается его номер p ; из графа $G_l^j(Q_l^j, X_l^j)$ исключаются вершины нити H_j^p , в результате чего формируется новый граф $G_l^{j+1}(Q_l^{j+1}, X_l^{j+1}) = G_l^j(Q_l^j, X_l^j)/H_j^p$; вершинам q_b^{j+1} модифицированного графа $G_l^{j+1}(Q_l^{j+1}, X_l^{j+1})$, инцидентным вершинам q_b^{jp} нити H_j^p , приписывается требуемое время их исполнения, определяемое как (рис. 6)

$$T_{b+1}^{j+1} = T_{k+1}^j - \left(\sum_{i=d}^k t_p(A_i) + t_{\Pi} \right),$$

а также номер объекта R_p , которому необходимо передать результаты исполнения операции, приписанной вершине q_b^{j+1} .

8. Если первая вершина q_1^{jp} нити $H_j^p = \langle q_1^{jp}, q_2^{jp}, \dots, q_k^{jp} \rangle$ — это начальная вершина графа $G_l(Q_l, X_l)$, то объект R_p приступает к исполнению операций, приписанных вершинам этой нити. В противном случае объект R_p ожидает поступления результатов выполнения операции, приписанной вершине q_b^{j+1} , инцидентной вершине q_1^{jp} (рис. 6).

9. $d = 1$.

10. Если $T_d^{jp} < T_{\text{тек}}$, где $T_d^{jp} = T_{k+1}^{jp} - \left(\sum_{i=d}^k t_p(A_i) + t_{\Pi} \right)$ — требуемое время начала выполнения операции A_d , приписанной вершине $q_b^{jp} \in H_j^p$, то перейти к 15, иначе

11. Объект R_p выполняет операцию A_d , приписанную вершине $q_b^{jp} \in H_j^p$.

12. Если объекту R_p поступило сообщение о прекращении выполнения задания Z_l , то переход к 1, иначе

13. $d = d + 1$, если $d \leq k$, то переход к 10, иначе

14. После выполнения всех операций нити H_j^p номер объекта R_p исключается из списка членов сообщества R_l по выполнению задания Z_l в его дескрипторе на ДО, а результат выполнения последней операции нити H_j^p передается объекту R_c , номер которого приписан последней вершине q_k^{jp} нити H_j^p , или потребителю, если последняя вершина выполненной нити H_j^p — это конечная вершина графа $G_l(Q_l, X_l)$, т. е. $q_k^{jp} = q_k$. При этом дескриптор задания Z_l удаляется с ДО. Переход к 1.

15. Задание Z не может быть выполнено. Дескриптор задания Z_l удаляется с ДО, потребителю направляется сообщение о невозможности выполнения его задания, а всем объектам, номера которых записаны в списке участников сообщества по выполнению задания Z_l , передается сообщение о прекращении его исполнения. Переход к 1.

Вариант 4

В самом сложном варианте исходной постановки объекты множества $R = \langle R_1, R_2, \dots, R_N \rangle$ выполняют различные наборы операции A_i , причем время выполнения идентичных операций различными объектами также различно.

Здесь, как и в предыдущем варианте, объект R_p , обнаруживший на ДО дескриптор задания Z_l , должен первым делом выделить в графе $G_l^j(Q_l^j, X_l^j)$ подграф $G_l^{jp}(Q_l^{jp}, X_l^{jp})$, вершинам которого приписаны операции, входящие в множество A_p . Далее в графе $G_l^{jp}(Q_l^{jp}, X_l^{jp})$ объект R_p выделяет наиболее длинную нить H_f^p , конечной вершине q_k^{jp} которой

приписано требуемое время исполнения T_{k+1}^f , и анализирует возможность ее исполнения к данному моменту времени. Для этого он определяет время начала исполнения операции, приписанной первой вершине данной нити H_f^p , как $T_1^{fp} = T_{k+1}^f - \left(\sum_{i=1}^k t_p(A_i) + t_{\Pi} \right)$, и сравнивает его с текущим вре-

менем $T_{\text{тек}}$. Если $T_{\text{тек}} > T_1^{fp}$, то это означает, что объект R_p не может выполнить данную нить к требуемому моменту времени T_{k+1}^f . Поскольку в данном варианте принято, что объекты множества R выполняют идентичные операции за различное время, то в дальнейшем может появиться объект R_c ,

который сможет выполнить нить H_j^p к моменту времени T_{k+1}^f . Поэтому, в отличие от варианта 3, в данном случае задание Z_l не снимается с ДО, а объект R_p продолжает анализировать следующие по убыванию длины нити графа $G_l^{jp}(Q_l^{jp}, X_l^{jp})$ до тех пор, пока он не найдет нить, которую он может выполнить к требуемому моменту времени, либо пока не переберет все возможные нити графа $G_l^{jp}(Q_l^{jp}, X_l^{jp})$.

В остальном процедура распределения не отличается от той, которая описана в варианте 3.

Исходя из этих соображений алгоритм работы объекта R_p системы R при выполнении потока заданий в условиях, когда объекты выполняют различные наборы операций за различное время, можно представить в следующем виде.

Алгоритм 4.

1. Свободный объект R_p спрашивает ДО.
2. При обнаружении на ДО задания Z_i объект R_p считывает его дескриптор и анализирует граф задания $G_i^j(Q_i^j, X_i^j)$. Если $G_i^j(Q_i^j, X_i^j) = \emptyset$, то переход к 1, иначе

3. Если $T_{\text{тек}} \geq T_{\text{макс}}^l$, где $T_{\text{тек}}$ — текущий момент времени, то переход к 20, иначе

4. В графе $G_i^j(Q_i^j, X_i^j)$ выделяется подграф $G_l^{jp}(Q_l^{jp}, X_l^{jp})$, вершинам которого приписаны операции множества A_p , выполняемые объектом R_p .

5. Если $G_l^{jp}(Q_l^{jp}, X_l^{jp}) = \emptyset$ или ни одной из вершин графа $G_l^{jp}(Q_l^{jp}, X_l^{jp})$ не приписано требуемое время T_{k+1}^j ее исполнения, то перейти к 1, иначе

6. $i = 1$; $G_i(Q_i, X_i) = G_l^{jp}(Q_l^{jp}, X_l^{jp})$.

7. Объект R_p выделяет в графе $G_i(Q_i, X_i)$ наиболее длинную нить $H_i^p = \langle q_1^{ip}, q_2^{ip}, \dots, q_k^{ip} \rangle$, для конечной вершины q_k^{ip} которой определено требуемое время исполнения T_{k+1}^i (если $H_i = H_1$, то $T_{k+1}^i = T_{\text{макс}}^l$), и определяет момент времени, когда он должен приступить к ее выполнению, как

$$T_1^{ip} = T_{k+1}^i - \left(\sum_{m=1}^k t_p(A_m) + t_{\Pi} \right).$$

8. Если $T_1^{ip} \geq T_{\text{тек}}$, где $T_{\text{тек}}$ — текущий момент времени, то переход к 12, иначе

9. Нить H_i^p исключается из графа $G_i(Q_i, X_i)$, т. е.

$$G_{i+1}(Q_{i+1}, X_{i+1}) = G_i(Q_i, X_i) / H_i^p.$$

10. Если $G_{i+1}(Q_{i+1}, X_{i+1}) = \emptyset$, то перейти к 1, иначе

11. $i = i + 1$, перейти к 7.

12. Объект R_p принимает на себя исполнение нити H_i^p , для чего модифицирует дескриптор задания Z_i на ДО: в список участников сообщества записывается его номер p ; из графа $G_i^j(Q_i^j, X_i^j)$ исключаются вершины нити H_i^p , в результате чего формируется новый граф $G_i^{j+1}(Q_i^{j+1}, X_i^{j+1}) = G_i^j(Q_i^j, X_i^j) / H_i^p$; вершинам q_b^{j+1} модифицированного графа $G_i^{j+1}(Q_i^{j+1}, X_i^{j+1})$, инцидентным вершинам q_d^{ip} нити H_i^p , приписывается требуемое время их исполнения, определяемое как (рис. 6)

$$T_{b+1}^{j+1} = T_{k+1}^i - \left(\sum_{m=d}^k t_p(A_m) + t_{\Pi} \right),$$

а также номер объекта R_p , которому необходимо передать результаты исполнения операции, приписанной вершине q_b^{j+1} .

13. Если первая вершина q_1^{ip} нити $H_i^p = \langle q_1^{ip}, q_2^{ip}, \dots, q_k^{ip} \rangle$ — это начальная вершина графа $G_i(Q_i, X_i)$, то объект R_p приступает к исполнению операций, приписанных вершинам этой нити. В противном случае объект R_p ожидает поступления результатов выполнения операции, приписанной вершине q_b^{j+1} , инцидентной вершине q_1^{ip} (рис. 6).

14. $d = 1$.

15. Если $T_d^{ip} < T_{\text{тек}}$, где $T_d^{ip} = T_{k+1}^i - \left(\sum_{m=d}^k t_p(A_m) + t_{\Pi} \right)$ — требуемое время начала выполнения операций A_d , приписанной вершине $q_d^{ip} \in H_i^p$, то перейти к 15, иначе

16. Объект R_p выполняет операцию A_d , приписанную вершине $q_d^{ip} \in H_i^p$.

17. Если объекту R_p поступило сообщение о прекращении выполнения задания Z_i , то переход к 1, иначе

18. $d = d + 1$, если $d \leq k$, то переход к 15, иначе

19. После выполнения всех операций нити H_i^p номер объекта R_p исключается из списка членов сообщества по выполнению задания Z_l в его дескрипторе на ДО, а результат выполнения последней операции нити H_i^p передается объекту R_c , номер которого приписан последней вершине q_k^{ip} нити H_i^p , или потребителю, если последняя вершина выполненной нити H_i^p — это конечная вершина графа $G_l(Q_l, X_l)$, т. е. $q_k^{ip} = q_k$. При этом дескриптор задания Z_l удаляется с ДО. Переход к 1.

20. Задание Z не может быть выполнено. Дескриптор задания Z_l удаляется с ДО, потребителю направляется сообщение о невозможности выполнения его задания, а всем объектам, номера которых записаны в списке участников сообщества по выполнению задания Z_l , передается сообщение о прекращении его исполнения. Переход к 1.

Результаты экспериментальных исследований

В целях исследования работоспособности и эффективности предложенного децентрализованного метода управления объектами распределенной системы R при выполнении потока заданий Z была разработана программная модель. Программная модель обеспечивает возможность моделирования работы распределенной системы R при различных значениях таких исходных параметров, как

- число объектов в системе (до 1000 шт.);
- число различных операций, выполняемых объектами, входящими в систему (до 20);
- время выполнения отдельных операций различными объектами системы;
- сложность (число операций в графе) заданий и частота их появления;
- требуемое время выполнения потребительских заданий.

При этом в качестве критериев эффективности работы распределенной системы при выполнении потока заданий были приняты:

- коэффициент полезного действия (КПД) — отношение времени, затраченного объектами системы на выполнение потребительских заданий, к общему времени их работы в системе;
- коэффициент гарантированности выполнения (КГВ) потребительского задания — отношение числа потребительских заданий, выполненных к требуемому моменту времени, к общему числу заданий, направленных потребителями на ДО.

Результаты серии экспериментов, проведенных при различных значениях исходных параметров программной модели, показали, что значение КПД не опускается ниже 75 %, а его среднее значение составляет 84 %; значение КГВ не опускается ниже 91 %, а среднее значение составляет 97 %.

Заключение

В статье описаны общие принципы организации децентрализованного управления распределенной системой, состоящей из множества независимых объектов, объединенных сетевым каналом связи, при выполнении потока потребительских заданий, поступающих в заранее неизвестные моменты времени. Реализация предлагаемого подхода позволяет:

- обеспечить квазиоптимальное автоматическое распределение операций различных заданий между объектами распределенной системы;
- обеспечить высокую полезную загрузку объектов системы при выполнении потока потребительских заданий;
- обеспечить высокую вероятность выполнения потребительских заданий в установленное время;
- обеспечить возможность неограниченного наращивания (масштабируемости) числа объектов в системе;
- обеспечить повышенную отказоустойчивость распределенной системы, поскольку выход из строя любого из них не приводит к катастрофическим последствиям для системы в целом.

Список литературы

1. Юревич Е. И. О проблеме группового управления роботами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 2. С. 9—13.
2. Каляев И. А., Мельник Э. В. Децентрализованные системы компьютерного управления. Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2011. 196 с.
3. Интеллектуальные роботы / Под редакцией Е. И. Юревича. М.: Машиностроение, 2007. 360 с.
4. Каляев И. А. Метод коллективного управления группой объектов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 3. С. 9—15.
5. Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Физматлит, 2009. 278 с.
6. Зуховицкий С. И., Радчик И. А. Математические методы сетевого планирования. М.: Наука, 1965. 360 с.
7. Кофман А., Дебезей Г. Сетевые методы планирования. М.: Прогресс, 1968. 182 с.
8. Новиков Д. А. Управление проектами. Организационные механизмы. М.: ПМСОФТ, 2007. 140 с.
9. Рейнгольд Э., Нивергельт Ю., Део Н. Комбинаторные алгоритмы. Теория и практика. М.: Мир, 1980. 476 с.

Method of Decentralized Control of the Distributed System during Execution of the Task Flow

A. I. Kalyaev, anatoly@kalyaev.net, I. A. Kalyaev, kaliaev@mvs.sfedu.ru✉,
Scientific Research Institute of Multiprocessor Computer Systems named after Academician A. V. Kalyaev,
Taganrog, 347928, Russian Federation

Corresponding author: **Kalyaev Igor A.**, D. Sc., Director,
Scientific Research Institute of Multiprocessor Computer Systems
named after Academician A. V. Kalyaev,
Taganrog, 347928, Russian Federation, e-mail: kaliaev@mvs.sfedu.ru

Received on April 16, 2015

Accepted on May 13, 2015

This paper is devoted to the distributed control system with the network architecture consisting of a multitude of objects united by a communication channel and participating in implementation of the flow of the incoming consumer tasks. At that, it is assumed that each consumer task consists of a set of interconnected operations, presented as an acyclic graph, and can appear any moment. In the paper the authors show that a centralized management solution with a single control unit in such a distributed system with a large number of objects is very complicated. Therefore, they propose a method for a decentralized management of the distributed systems using multiple management devices for the individual objects. They propose new algorithms for individual management of the objects of a distributed system for four versions of the original statement: the objects can perform the same set of operations at the same time; the objects perform the same set of operations, but the times of execution of the identical operations in various objects are different; the objects perform different sets of operations, but the times of execution of the identical operations are equal; the objects perform different sets of operations and the times of execution of the identical operations in different objects are different. In conclusion the authors present the results of the experimental researches of the proposed algorithms achieved due to application of the program model of the distributed system.

Keywords: distributed system, flow of tasks, decentralized management, operations distribution

For citation:

Kalyaev A. I., Kalyaev I. A. Method of Decentralized Control of the Distributed System during Execution of the Task Flow, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 9, pp. 585—598.

DOI: 10.17587/mau.16.585-598

References

1. **Jurevich E. I.** *O problem grupovogo upravleniya robotami* (About the problem of group control robots), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2004, 2, pp. 9—13.
2. **Kalyaev I. A., Melnik E. V.** *Decentralizovannyye sistemy komp'yuternogo upravleniya* (Distributed computer control systems), Rostov-na-Donu, JuNC RAN, 2011, 196 p.
3. **Jurevich E. I.** ed. *Intellektual'nye roboty* (Intelligent Robots), Mashinostroenie, 2007, 360 p.

4. **Kalyaev I. A.** *Metod kollektivnogo upravleniya gruppoy ob'ektov* (Method of collective management of a group of objects), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2004, no. 3, pp. 9—15.

5. **Kalyaev I. A., Gajduk A. R., Kapustjan S. G.** *Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppah robotov* (Models and algorithms for collective management in groups of robots), Moscow, Fizmatlit, 2009, 278 p.

6. **Zuhovickij S. I., Radchik I. A.** *Matematicheskie metody setevogo planirovaniya* (Mathematical methods of network planning), Nauka, 1965, 360 p.

7. **Kofman A., Debezej G.** *Setevye metody planirovaniya* (Network planning methods), Progress, 1968, 182 p.

8. **Novikov D. A.** *Upravlenie proektami. Organizacionnyye mehanizmy* (Project management. Institutional arrangements), PMSOFT, 2007, 140 p.

9. **RejngoI'd Je., Nivergel't Ju., Deo N.** *Kombinatornye algoritmy. Teoriya i praktika* (Combinatorial algorithms. Theory and practice), Mir, 1980, 476 p.

ИНФОРМАЦИЯ

21—23 октября 2015 г.

в Москве в ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН состоится

Седьмая Всероссийская научно-практическая

**"ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА"
(ИММОД-2015)**

Тематические направления конференции:

- Теоретические основы и методология имитационного и комплексного моделирования
- Методы оценивания качества моделей полимодельных комплексов
- Методы и системы распределенного моделирования
- Моделирование глобальных процессов
- Средства автоматизации и визуализации имитационного моделирования
- Системная динамика (с обязательным наличием имитационной составляющей в созданной, либо использованной модельно-алгоритмической разработке)
- Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования
- Имитационное и комплексное моделирование в обучении и образовании

Подробную информацию о конференции см. на сайте:

<http://www.simulation.su/>

О. Н. Корсун, д-р техн. наук, проф. marmotto@rambler.ru,
ФГУП "Государственный институт авиационных систем" ГИЦ РФ, г. Москва,
А. Ш. Габдрахманов, аспирант, besh5500@mail.ru, **Е. И. Михайлов**, студент, **М. З. Нахаев**, студент,
Московский физико-технический институт, г. Москва,
А. К. Тулекбаева, канд. техн. наук, зав. каф.,
Южно-Казахстанский государственный университет им. М. Ауэзова, г. Чимкент, Республика Казахстан

Алгоритм автоматического распознавания речевых команд, инвариантный к изменению языка¹

Рассматривается проблема применимости разработанных помехоустойчивых алгоритмов автоматического распознавания речевых команд к другим языкам в целях совершенствования интерфейса бортового оборудования современных самолетов и других технических систем. Описываются алгоритм параметризации речевого сигнала, метод формирования эталона, алгоритм сравнения и подавления акустических помех, основанный на линейной регрессии и применении дополнительного микрофона. Представлены результаты нескольких серий экспериментов для русского, казахского и таджикского языков, показывающие, что описанные алгоритмы остаются работоспособными и не нуждаются в изменениях при распознавании слов на другом языке.

Ключевые слова: автоматическое распознавание речи, помехоустойчивые алгоритмы распознавание речи, речевое управление бортовым оборудованием самолета, инвариантность алгоритма к другим языкам

Введение

Одним из перспективных направлений развития интерфейса кабины пилотов современных самолетов является речевое управление бортовым оборудованием. Основным элементом системы речевого управления бортовым оборудованием самолетов является автоматическое распознавание речевых команд, эффективность которого определяется многими факторами, в том числе зависящими от условий полета. К числу таких факторов относятся акустические помехи различных видов [1], уровень которых на самолетах гражданской авиации может достигать 80 дБ. Устойчивость к воздействию акустических помех является одним из важнейших требований, предъявляемых к системам речевого управления бортовым оборудованием. Помимо этого немаловажным требованием к таким алгоритмам является их быстрая подстройка к новому языку, которая затруднена в распространенных методах распознавания, таких как скрытые марковские модели [2–7] и нейронные сети [3], поскольку они учитывают фонетическую транскрипцию слов и деление на слоги.

В статье рассматривается алгоритм, основанный на сравнении с эталонами слов, повышающий устойчивость распознавания в условиях воздействия аддитивных акустических шумов.

¹ Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 12-08-00670-а.

Исследуемый алгоритм основан на известных методах параметризации речевого сигнала, заключающихся в квантовании исходного акустического сигнала по времени, вычислении оценок спектральной плотности с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье, применении спектрального окна, вычислении Мел-спектральных и кепстральных преобразований [2–8]. Предложены методы сравнения, основанные на поиске максимального коэффициента корреляции и разложении по методу линейной регрессии. Второй подход обеспечивает высокий уровень помехозащищенности при использовании дополнительного микрофона [4].

В работе представлены результаты экспериментальной проверки работоспособности этого алгоритма при изменении языка.

1. Аналитическое преобразование сигнала

Записанный речевой сигнал в цифровом виде представляет собой набор параметров $\tilde{x}(N)$, где N — число отсчетов в файле. Для возможности обработки в системе автоматического распознавания необходимо выполнить следующую последовательность преобразований исходного временного сигнала [2]:

- предварительная фильтрация сигнала

$$x(n) = \tilde{x}(n) - \alpha \tilde{x}(n-1), \alpha = 0,95;$$

- выделение кадра сигнала

$$s_m(n) = x(m\Delta n + n), 0 \leq n \leq N_{FFT} - 1,$$

где

$$\Delta_n = N_{FFT} - \varepsilon N_{FFT},$$

N_{FFT} — длина быстрого преобразования Фурье в отсчетах (длина кадра), ε — отношение длины участка перекрытия к длине кадра, $0 \leq \varepsilon \leq 0,5$, m — номер кадра;

- взвешивание кадра окном Ханна

$$s_m(n) = w_{H_2}(n) \tilde{s}_m(n),$$

где $w_{H_2} = 0,5 \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi n}{N_{FFT} - 1} \right) \right)$ — окно Ханна;

- вычисление быстрого преобразования Фурье (Fast Fourier transform — FFT) и его модуля, или оценки спектральной плотности,

$$X_m(k) = FFT\{s_m(n)\} = \sum_{n=0}^{N_{FFT}-1} s_m(n) \cdot e^{j\frac{2\pi kn}{N_{FFT}}},$$

$$A_m(k) = |X_m(k)| = \sqrt{(\text{Re}(X_m(k)))^2 + (\text{Im}(X_m(k)))^2};$$

- расчет логарифма спектральной плотности

$$S_m(f_i) = \ln \left(\frac{1}{\Delta k} \sum_{k=k_{i,\min}}^{k_{i,\max}} A_m(k) \right),$$

где $\Delta k = k_{i,\max} - k_{i,\min} + 1$ — ширина спектральной полосы (не зависит от номера полосы), $k_{i,\min}$, $k_{i,\max}$ — индексы первой и последней частоты в спектральной полосе;

$$k_{i,\min} = \left\lfloor \frac{N_{FFT}}{f_s} \left(f_{\min} + \frac{f_{\max} - f_{\min}}{N_{frb}} (i - 1) \right) \right\rfloor + 1,$$

$$i = 2 \dots N_{frb}, k_{1,\min} = \left\lfloor \frac{N_{FFT}}{f_s} f_{\min} \right\rfloor,$$

$$k_{i,\max} = \left\lfloor \frac{N_{FFT}}{f_s} \left(f_{\min} + \frac{f_{\max} - f_{\min}}{N_{frb}} i \right) \right\rfloor, i = 1 \dots N_{frb},$$

$$f_i = f_{\min} + \frac{f_{\max} - f_{\min}}{N_{frb}} \left(i + \frac{1}{2} \right), i = 1 \dots N_{frb},$$

где f_i — частота, соответствующая середине i -й полосы, f_s — частота дискретизации, N_{frb} — число спектральных полос в параметрическом портрете.

Таким образом, в качестве параметров, характеризующих речевой сигнал, рассматривается полученная после всех преобразований последовательность логарифмов спектральной плотности в функции дискретных значений частоты, вычисленных на скользящем временном интервале длительностью 25...45 мс. Далее этот вариант, основанный на классическом определении спектральной плотности сигнала, будем называть спектральным.

В качестве другого варианта параметризации используется преобразование шкалы частот к шкале Мел-частот:

$$m(f) = 2595 \lg \left(1 + \frac{f}{700} \right) = 1127 \ln \left(1 + \frac{f}{700} \right).$$

Расчет соответствующего Мел-спектра осуществляется по следующим формулам:

$$S_{m, Me}(f_i) = \ln \left(\frac{1}{k_{i,\max} - k_{i,\min} + 1} \sum_{k=k_{i,\min}}^{k_{i,\max}} \varphi_i(k) A_m(k) \right),$$

где

$$f_i = m^{-1} \left(m(f_{\min}) + \frac{m(f_{\max}) - m(f_{\min})}{N_{frb} + 1} i \right), i = 1 \dots N_{frb},$$

где f_i — частота, соответствующая середине i -й полосы; $k_i = \left\lfloor \frac{N_{FFT}}{f_s} f_i \right\rfloor$ — индекс, соответствующий середине; $k_{i,\min}$, $k_{i,\max}$ — индексы первой и последней частот в спектральной полосе, $k_{i,\min} = k_i - 1$, $k_{i,\max} = k_i + 1$; f_s — частота дискретизации; $\varphi_i(k)$ — весовая функция.

В качестве третьего варианта параметризации рассматривается преобразование исходного временного сигнала в Мел-кепстральные коэффициенты, являющиеся косинусным преобразованием рассмотренных выше Мел-спектральных коэффициентов [5, 6, 8].

В предлагаемом алгоритме все слова при параметризации приводятся к матрицам одинаковой размерности. Опытным путем было установлено, что при распознавании слов средней длины рациональное число кадров, при котором малы и число ошибок, и вычислительная сложность, равно 17. Рациональное число частотных полос при частоте регистрации 22 кГц для спектрального и Мел-спектрального методов параметризации равно 35, а для Мел-кепстрального типа параметризации — 10. Исходя из этих параметров и в зависимости от длительности записи при преобразовании вычисляется соответствующая длина кадра.

На рис. 1 (см. вторую сторону обложки) приведен график результатов описанного выше спектрального варианта параметрического портрета слова "пилотаж".

2. Составление эталонов слов

Для работы алгоритма распознавания необходимо создать эталоны, с которыми и будет проводиться сравнение полученных сигналов. Для создания эталона, учитывая вариативность длительности произношения, целесообразно выбрать слова близкой длительности. Для этого необходимо из мас-

сива реализаций каждого слова для одного или нескольких дикторов отобрать такие, для которых будет выполняться условие

$$|N_i - M(N)| < 0,5\sigma(N),$$

где N_i — длительность реализации слова в отсчетах; $M(N)$ — математическое ожидание длительности слов для данной выборки; $\sigma(N)$ — среднеквадратическое отклонение (СКО) длительностей слов.

Коэффициент при СКО в общем случае может изменяться.

Далее формируется портрет эталонного слова путем осреднения параметрических портретов всех отобранных на предыдущем этапе слов. Под осреднением понимается вычисление среднего арифметического для каждой ячейки матрицы эталона по соответствующим значениям матриц отобранных ранее слов. Сформированные таким образом эталоны в дальнейшем используются для сравнения с портретом неизвестной речевой команды, т. е. для ее распознавания.

3. Алгоритм распознавания речевой команды на основе коэффициентов корреляции

В качестве методов сравнения неизвестного слова с эталонными словами предлагается несколько алгоритмов. Один из них основан на вычислении соответствующих коэффициентов корреляции. Этот алгоритм сравнения неизвестного слова с эталонами состоит из нескольких этапов. На первом этапе для исходного звукового файла вычисляется его параметрический портрет (двумерная матрица) описанным выше способом. На втором этапе для вектора, полученного путем "вытягивания" матрицы по столбцам вверх, вычисляются коэффициенты корреляции с каждым из эталонных векторов, полученных таким же способом. На третьем этапе принимается решение о том, что неизвестное слово соответствует тому эталону, для которого полученный коэффициент корреляции максимален.

Заметим, что при таком методе формирования параметрических портретов неизвестных слов и эталонов и методе сравнения отсутствует привязка к особенностям языка и к фонетической транскрипции слова, которая имеет место при распознавании другими известными методами, как например, в методе скрытых марковских моделей [2]. Ограничительным является лишь условие, что распознаваемое и эталонное слова должны быть на одном языке.

Достоинство рассматриваемого алгоритма состоит также в возможности формирования эталона по малому числу дикторов, что уменьшает требования к объему речевого материала для обучающих выборок. Так, в представленных ниже экспериментах для всех языков эталоны формировались по запи-

сям только одного диктора, примерно по 15 реализациям каждого слова.

Для проверки работоспособности алгоритма распознавания был собран речевой материал дикторов-носителей языка для нескольких существенно различных языков: русского (12 дикторов), казахского (5 дикторов) и таджикского (3 диктора).

Каждый диктор произносил 3 слова, примерно по 50 реализаций каждого.

Результаты представлены в табл. 1—3.

По результатам видно, что разработанный метод продолжает показывать высокий уровень распознавания при переходе к речевому материалу на других языках.

Однако эффективность распознавания на основе максимума коэффициента корреляции существенно снижается в условиях акустического шума. Поэтому в работе [4] предложен способ распознавания, основанный на методе линейной регрессии и применении дополнительного микрофона, краткое описание которого дано в следующем разделе.

Таблица 1
Доля ошибок распознавания слов на русском языке, %
(эталон — Н-ов (Россия))

Слово	Метод параметризации		
	Спектральный	Мел-спектральный	Мел-кепстральный
Слово 1	0,5	0,5	0
Слово 2	0	1,1	10,2
Слово 3	0	0	0,5
Итог	0,2	0,5	3,2

Таблица 2
Доля ошибок распознавания слов на таджикском языке, %
(эталон — Е-в (Таджикистан))

Слово	Метод параметризации		
	Спектральный	Мел-спектральный	Мел-кепстральный
Слово 1	0	0	0
Слово 2	0,8	0,8	0,8
Слово 3	0,6	0,6	1,9
Итог	0,4	0,4	0,9

Таблица 3
Доля ошибок распознавания слов на казахском языке, %
(эталон — С-т (Казахстан))

Слово	Метод параметризации		
	Спектральный	Мел-спектральный	Мел-кепстральный
Слово 1	0	0	4,2
Слово 2	13,1	6,3	0
Слово 3	0,9	4,2	4,7
Итог	4,2	3,3	3,1

4. Метод подавления акустических помех, основанный на множественной линейной регрессии и применении дополнительного микрофона

Для распознавания слов как в спокойной акустической обстановке, так и в условиях шума был разработан алгоритм [4], заключающийся в разложении вектора параметрического портрета слова по базису векторов параметрических портретов эталонных слов. Для записей с шумом в базис необходимо также включить нормированный вектор параметрического портрета шума. Рассмотрим этот подход подробнее.

Предлагаемый алгоритм основан на соотношениях, представленных в предыдущих разделах. Кроме того, в алгоритме используется множественная линейная регрессия портрета слова на эталоны и портрет сигнала шума. Данный подход требует наличия дополнительного микрофона, отстоящего от диктора на расстоянии 30...70 см и измеряющего сигнал акустической помехи. Сигнал шума преобразуется в последовательность наборов параметров по тому же алгоритму, что и записанный речевой сигнал. Затем из эталонов и портрета сигнала помехи строится матрица регрессоров

$$Z = \|\tilde{e}_1, \tilde{e}_2, \tilde{e}_3, \dots, \tilde{e}_n, \tilde{n}\|,$$

где $\tilde{e}_i = \frac{e_i}{\|e_i\|}$, $\tilde{n} = \frac{n}{\|n\|}$ — нормированные эталоны и портрет шума.

Далее, в соответствии с методом множественной линейной регрессии вычисляются коэффициенты разложения портрета речевой команды на вектор-столбцы матрицы Z :

$$x = Z^T \beta + \varepsilon,$$

где x — портрет неизвестной речевой команды; β — столбец с коэффициентами разложения; ε — вектор ошибок.

Оценка вектора β имеет вид

$$\hat{\beta} = (ZZ^T)^{-1}Zx.$$

При распознавании речевой команды, представленной в виде "портрета" x , выбирается эталон, который соответствует наибольшему коэффициенту регрессии. При этом ожидается, что большая часть составляющей вектора x , содержащая аддитивную помеху, при разложении проецируется на вектор нормированного портрета шума, что уменьшает влияние шума на распознавание.

Результаты проверки работоспособности данного алгоритма для русского языка как в спокойной акустической обстановке, так и в условиях аддитивных шумов подробно представлены в работе [4].

Результаты для слов на таджикском и казахском языках в спокойных условиях показаны в табл. 4, 5.

Таблица 4

Результаты распознавания слов без шума на таджикском языке методом линейной регрессии (эталон — Е-в (Таджикистан))

Слово	Метод параметризации		
	Спектральный	Мел-спектральный	Мел-кепстральный
Слово 1	0	0	0
Слово 2	0,8	0,8	0,8
Слово 3	0,6	0,6	11,9
Итог	0,4	0,4	4,2

Таблица 5

Результаты распознавания слов без шума на казахском языке методом линейной регрессии (эталон — С-т (Казахстан))

Слово	Метод параметризации		
	Спектральный	Мел-спектральный	Мел-кепстральный
Слово 1	0	0,5	2,4
Слово 2	18,8	9,1	0
Слово 3	0,98	1,9	4,7
Итог	5,8	3,5	2,5

По этим данным видно, что уровень распознавания для слов без шума примерно соответствует уровню распознавания с помощью коэффициента корреляции (см. табл. 1—3).

Однако для случая распознавания слов из предложенных подходит только метод, основанный на применении линейной регрессии, так как он позволяет учитывать информацию о шуме с дополнительного микрофона. Для экспериментальной проверки работоспособности алгоритма в условиях аддитивного шума был проведен эксперимент, состоящий из двух этапов. На первом этапе диктор зачитывал слова в спокойных условиях. На втором этапе, не меняя положения основной гарнитуры, проводили запись шума, в том числе и на дополнительный микрофон. Далее в программной среде MATLAB смешивали две записи. Таким образом, были получены записи слов в условиях аддитивного шума. В эксперименте была задействована запись шума кабины пилотов пассажирского самолета двух уровней: 80 и 90 дБ (максимально допустимые уровни шума в кабинах самолетов гражданской авиации [1]).

Ниже приведены результаты распознавания как в случае применения дополнительного микрофона, так и без него. Для более наглядного представления эффективности применения информации с дополнительного микрофона, по которой раскладывается шумовая составляющая основного сигнала, результаты изображены в виде диаграмм, на которых по оси ординат отложена доля ошибок (%) для трех методов параметризации. Для слов на таджикском языке сравнительные результаты представлены на рис. 2 (см. вторую сторону обложки),

слов на казахском языке — на рис. 3 (см. вторую сторону обложки).

Как видно из рис. 2, 3, число ошибок значительно сокращается при распознавании данным алгоритмом слов в условиях аддитивного шума. Минимальное число ошибок показывает спектральный метод параметризации. Для него использование информации с дополнительного микрофона дает также и наибольшее снижение ошибок — в 3...9 раз.

Таким образом, предложенный помехоустойчивый алгоритм распознавания продолжает сохранять все свои свойства (высокое качество распознавания, дикторнезависимость, помехозащищенность) и при изменении языка, причем не требуется внести в алгоритм каких-либо изменений.

Заключение

В статье рассмотрен алгоритм автоматического распознавания, построенный в соответствии с известным принципом сравнения с эталоном слова, и его помехоустойчивая модификация [4], использующая линейную регрессию и дополнительный микрофон.

Проведены экспериментальные исследования по оцениванию характеристик данных алгоритмов для речевого материала на нескольких языках. Показано, что предложенные алгоритмы, показавшие хорошее качество распознавания для малословарной системы на русском языке [4], полностью сохраняют свои свойства, в том числе и помехоустойчивость, при решении аналогичных задач на казахском и таджикском языках. В частности, сохраняется возможность формирования эталона по речевому материалу только одного диктора.

Направлениями дальнейшего совершенствования алгоритма являются расширение набора распознаваемых слов и переход к распознаванию речевых команд, состоящих из фраз.

Авторы выражают особую благодарность за помощь в наборе речевого материала на казахском языке сотрудникам кафедры "Стандартизация и сертификация" Южно-Казахстанского Государственного университета им. М. Ауэзова, г. Чимкент, Республика Казахстан: преподавателю магистру Бакытжанову Сабиту, старшему преподавателю магистру Сарсенбай Сабыру Омирбаевичу, канд. техн. наук доценту Ешанкулову Амирхану Айткуловичу, преподавателю магистру Жолдасбековой Гаухар Шаяхметовне, преподавателю магистру Макулбековой Гульназ Оразбековне.

Список литературы

1. **ГОСТ 20296—81.** Самолеты и вертолеты гражданской авиации. Допустимые уровни шума в салонах и кабинах экипажа и методы измерения шума. М.: Госкомитет по стандартам, 1981. 9 с.
2. **Рабинер Л. Р.** Скрытые марковские модели и их применение в избранных приложениях при распознавании речи: Пер. с англ. // Тр. института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (ТИИЭР). 1989. Т. 77, № 2. С. 86—120.
3. **Swietlicka I., Kuniszyk-J'ozkowiak W., Smolka E.** Artificial neural networks in the disabled speech analysis // Proc. of Computer Recognition System 3. 2009. Vol. 57. P. 347—354.
4. **Корсун О. Н., Габдрахманов А. Ш.** Помехозащищенный алгоритм речевого управления бортовым оборудованием самолета // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2014. № 4. С. 3—7.
5. **Peinado A. M., Segura J. C.** Speech Recognition over Digital Channels: Robustness and Standards. NJ: John Wiley & Sons, 2006. 274 p.
6. **Rabiner L., Juang B. H.** Fundamentals of Speech Recognition. Prentice-Hall International, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1993. 507 p.
7. **Wisniewski M., Kuniszyk-J'ozkowiak W., Smolka E., Suszynski W.** Automatic detection of disorders in a continuous speech with the hidden Markov models approach // Proc. of Computer Recognition Systems 2. 2008. Vol. 45. P. 445—453.
8. **O. Chia Ai, Hariharan M., Yaacob S., Sin Chee L.** Classification of speech dysfluencies with MFCC and LPCC features // Expert Systems with Applications. Vol. 39. P. 2157—2165.

Algorithm for an Automatic Recognition of the Speech Commands, Invariant to Languages

O. N. Korsun, marmotto@rambler.ru✉, State Research Institute of Aviation Systems, State Scientific Center of the Russian Federation, Moscow, 125319, Russian Federation,
A. Sh. Gabdrakhmanov, besh5500@mail.ru, **E. I. Mihajlov**, **M. Z. Nahaev**,
Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Moscow, 141700, Russian Federation,
A. K. Tulekbaeva, South Kazakhstan State University named after M. O. Auevov,
Chymkent, 160012, Republic of Kazakhstan

*Corresponding author: Korsun Oleg N., D. Sc., Professor,
State Research Institute of Aviation Systems, State Scientific Center of the Russian Federation,
Moscow, 125319, Russian Federation, e-mail: marmotto@rambler.ru*

Received on April 23, 2015

Accepted on May 15, 2015

The topic of the article is the problem of applicability of the developed robust algorithms for an automatic recognition of the speech commands to the other languages in order to improve the interface of the onboard equipment of modern aircraft and other technical systems. Resistance to acoustic noise is one of the most important requirements to the on-board equipment of the voice control system. This paper describes the algorithms of parameterization of the speech signal, a method for formation of a pattern and algorithm for recognition of the individual words by comparison with the standards of words. Also, a noise resistance algorithm is described, which is based on a linear regression and application of an additional microphone, and intended to improve the acoustic noise resistance of the automatic speech command recognition. In this algorithm the mix of portraits of the recognized words and noises are compared simultaneously with the patterns and the signals from an additional microphone. The additional microphone is positioned at a distance of 0,3–0,7 m from a speaker in order to fix predominantly the acoustic noises in the cockpit. The report presents the results of several experiments for the Russian, Kazakh and Tajik languages, showing a high probability of recognition of the commands for the on-board equipment control in the conditions of additional noises with the level of 80–90 dB, which corresponds to the maximal admissible noise values in the cockpit of a modern long-range aircraft. The results also prove that the described algorithms can work well and do not require any changes for recognition of words in other languages.

Keywords: automatic speech recognition; noise-resistant algorithms of speech recognition; voice control of the aircraft equipment, algorithm invariant to languages

Acknowledgements: This work was supported by a grant from the Russian Foundation for Basic Research, project No. 12-08-00670-a.

For citation:

Korsun O. N., Gabdrakhmanov A. Sh., Mihajlov E. I., Nahaev M. Z., Tulekbaeva A. K. Algorithm for an Automatic Recognition of the Speech Commands, Invariant to Languages, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 9, pp. 599–604.

DOI: 10.17587/mau.16.599-604

References

1. **GOST 20296—81.** *Samolety i vertolety grazhdanskoi aviatsii. Dopustimye urovni shuma v salonakh i kabinakh ekipazha i metody izmeneniya shuma* (Aircraft and helicopter of civil aviation. Acceptable noise levels in flight decks and in salons and methods of noise measurement), Moscow, State Committee for Standards of the Soviet Union, 1981, 9 p.

2. **Rabiner L. R.** *Skrytye markovskie modeli i ikh primeneniye v izbrannykh prilozheniyakh pri raspoznavanii rechi* (Hidden markov models and their application in selected applications in speech recognition), *Trudy Instituta Inzhenerov po Elektrotekhnike i Radioelektronike* (TIER), 1989, 77 (2), pp. 86–120.

3. **Swietlicka I., Kuniszyk-J'ozkowiak W., Smolka E.** Artificial neural networks in the disabled speech analysis, *Proceedings of Computer Recognition System* 3, 2009, vol. 57, pp. 347–354.

4. **Korsun O. N., Gabdrakhmanov A. Sh.** *Pomekhozashchishchennyi algoritm rechevogo upravleniya bortovym oborudovaniem samoleta* (Noise resistant algorithm of voice control of aircraft equipment), *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii*, 2014, no. 4, pp. 3–7.

5. **Peinado A. M., Segura J. C.** *Speech Recognition over Digital Channels: Robustness and Standards*, NJ, John Wiley & Sons, 2006, 274 p.

6. **Rabiner L., Juang B. H.** *Fundamentals of Speech Recognition*, Prentice-Hall International, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1993, 507 p.

7. **Wisniewski M., Kuniszyk-J'ozkowiak W., Smolka E., Suszynski W.** Automatic detection of disorders in a continuous speech with the hidden Markov models approach, *Proceedings of Computer Recognition Systems* 2, 2008, vol. 15, pp. 445–453.

8. **O. Chia Ai, Hariharan M., Yaacob S., Sin Chee L.** Classification of speech dysfluencies with MFCC and LPCC features, *Expert Systems with Applications*, 2012, vol. 39, pp. 2157–2165.

УДК 004.8(075.8)

DOI: 10.17587/mau.16.604-616

А. В. Смеюха, студент, annatutta@gmail.com,

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

Б. Е. Федунов, д-р техн. наук, проф, нач. сектора, boris_fed@gosniias.ru,

ГосНИИАС, Москва

Математическое моделирование процесса решения тактических задач экипажем антропоцентрического объекта

Показана возможность создания математической модели работы оператора в типовых быстрых ситуациях (ТБС) функционирования антропоцентрических объектов (пилотируемых летательных аппаратов, транспортных средств и других технических систем с операторами). Модель оператора разрабатывается для каждой ТБС и состоит из двух блоков: блока имитации бортовых алгоритмов (ИБА), поставляющих информацию на информационно-управляющее поле (ИУП) в этой ТБС, и блока ситуационного управления (БСУ), имитирующего алгоритмы деятельности оператора при имеющейся текущей информации на ИУП и с имеющимися там органами управления.

Описывается процедура совместной разработки графа решений оператора и схемы бортовых алгоритмов в ТБС, необходимых для создания упомянутой математической модели работы оператора в ТБС. Также представлена совместная разработка ИБА и БСУ.

На примере антропоцентрического объекта "Истребитель F-16М3" демонстрируется работоспособность предлагаемого подхода.

Ключевые слова: типовые быстрые ситуации, информационно управляющее поле, бортовое алгоритмическое и индикационное обеспечение, граф решений оператора, блок ситуационного управления, блок имитации бортовых алгоритмов

Введение

Антропоцентрический объект (Антр/объект) — это некоторая физическая оболочка, содержащая: бортовые измерительные системы (Б/Изм/Системы), бортовые исполнительные системы (Б/Исп/Системы); развитую бортовую цифровую вычислительную систему (БЦВС) с реализованными в ней БЦВМ-алгоритмами; экипаж и его кабину с современным информационно-управляющим полем (ИУП), которое включает в себя информационное поле (многофункциональные индикаторы, речевые информаторы) и управляющее поле (органы управления и взаимодействия экипажа с самим Антр/объектом, с его Б/Изм/Системами и Б/Исп/Системами) [1]. Экипаж Антр/объекта может состоять из одного человека или нескольких людей. В последнем случае всегда выделен один главный член экипажа, называемый командиром экипажа. Он принимает окончательные решения задач системообразующего ядра Антр/объекта. Именно его мы имеем в виду, употребляя дальше термин "экипаж" или "оператор". Экипаж является главным системообразующим элементом Антр/объекта и реализует алгоритмы деятельности экипажа (АДЭ). Именно он решает задачи оперативного целеполагания и конструирования способа достижения оперативной назначенной цели функционирования Антр/объекта. Такие задачи называются тактическими. Разработка бортового алгоритмического и индикационного обеспечения (АиИО) Антр/объекта проходит следующие этапы:

а) создание текстовых технических документов "Логика работы системы экипаж — бортовая аппаратура", описывающих работу экипажа и работу бортовых систем Антр/объекта при его функционировании;

б) создание графов решений оператора (ГРО) и соответствующих им схем бортовых алгоритмов (СБА) [1];

в) разработка БЦВМ-алгоритмов бортового АиИО;
г) отработка АиИО на математических моделях;
д) отработка АиИО на стендах полунатурного моделирования;

е) натурные испытания Антр/объекта с бортовым АиИО.

На этапах отработки АиИО желательно участие профессионального экипажа, что по ряду причин часто бывает затруднительно. Это вынуждает разработчиков АиИО искать возможность моделировать работу экипажа с помощью математической модели. В части решения тактических задач создание такой модели является, в ряде случаев, возможным. Для этого последовательно рассмотрим концептуальную модель Антр/объекта: структуру деятельности оператора на Антр/объекте; ГРО при решении им тактических задач; схему бортовых алгоритмов, соответствующих ГРО. На основании

этого выделим те фрагменты функционирования Антр/объекта, для которых можно создать математическую модель работы экипажа, называемую далее блоком ситуационного управления (БСУ).

1. Концептуальная модель антропоцентрического объекта "Этап"

Опишем математическую модель (ММ) "Этап", ориентируясь на работу [2]. Эта модель формализует сферу деятельности Антр/объекта и классифицирует задачи, которые решаются на его борту (рис. 1).

Формализация в модели "Этап" сферы деятельности Антр/объекта включает в себя: модель процесса функционирования Антр/объекта, которая содержит набор назначенных (в техническом задании (ТЗ) на разработку Антр/объекта) к алгоритмизации сеансов функционирования (с описанием генеральной задачи каждого сеанса функционирования (ГЗФ)); представление каждого сеанса через семантическую сеть типовых ситуаций (ТС) и представление каждой ТС, в свою очередь, через семантическую сеть проблемных субситуаций (ПрС/С). Семантические сети строятся по причинно-следственному отношению.

Множество ТС конечно и строится по всей совокупности заданных в ТЗ сеансов функционирования.

Классификация задач Антр/объекта включает в себя выделение трех глобальных уровней управления (ГЛУУ):

а) I-ГЛУУ — уровень оперативного целеполагания. В терминах ММ "Этап" это задача назначения текущей ТС (на рис. 1 показана "обратная связь" от I-ГЛУУ к строке ТС);

б) II-ГЛУУ — уровень конструирования рационального способа достижения цели для ТС, назначенной на I-ГЛУУ. В терминах ММ "Этап" это за-

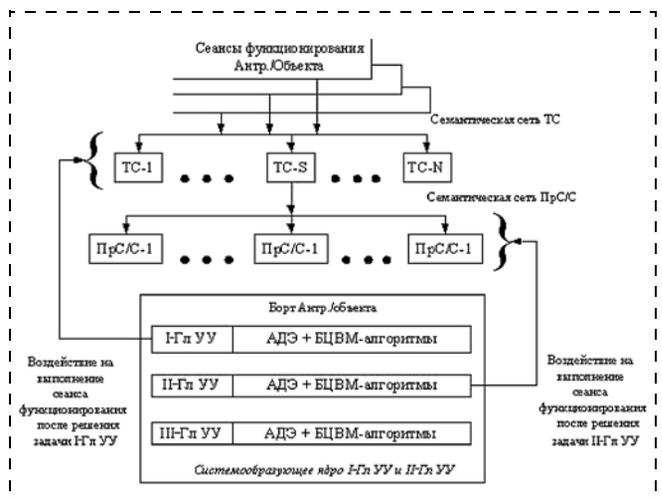


Рис. 1. Модель Антр/объекта "Этап" для проектирования бортового алгоритмического и индикационного обеспечения системообразующего ядра Антр/объект

дача оперативного построения конкретного фрагмента семантической сети ПрС/С назначенной ТС (на рис. 1 показана "обратная связь" от II-ГЛУУ к строке ПрС/С);

в) III-ГЛУУ — уровень реализации способа достижения цели, сконструированного на II-ГЛУУ.

Задачи I-ГЛУУ и II-ГЛУУ называются задачами "верхнего уровня", или тактическими задачами. Они решаются в системообразующем ядре Антр/объекта.

В модели "Этап" устанавливается, что в решении задач I-ГЛУУ и II-ГЛУУ обязательно участвует экипаж (на рис. 1 указывается аббревиатура АДЭ). При этом процесс решения экипажем задач этих ГЛУУ поддерживается в той или иной степени БЦВМ-алгоритмами. Полная поддержка этого процесса возможна только при размещении на борту Антр/объекта интеллектуальных систем. Эти системы должны решать соответствующие задачи и предъявлять экипажу рекомендуемый способ их решения. Этот способ может поступать на реализацию в Б/Исп/Системы только после согласия экипажа. В силу этого такие системы относят к классу бортовых оперативно советующих экспертных систем (БОСЭС).

ММ "Этап" позволяет классифицировать такие бортовые интеллектуальные системы поддержки процесса решения оператором тактических задач (БИС-ТЗ) следующим образом:

- системы, решающие задачи I-ГЛУУ [3];
- системы, решающие задачи II-ГЛУУ [4].

2. Структура деятельности оператора на борту технического антропоцентрического объекта в типовой быстрой ситуации

Деятельность оператора Антр/объекта включает в себя следующие составляющие: активизацию концептуальной модели поведения, принятие решений по оперативно возникающей проблеме, реализацию этих решений и участие в различных операциях слежения в качестве элемента следящей системы [5—9]. Вся необходимая информация для деятельности оператора представляется ему на индикаторах ИУП кабины экипажа и/или сообщается через кабинные речевые информаторы. Реализация решений и участие в операциях слежения осуществляется экипажем через органы управления на ИУП [10].

На этапе проектирования спецификаций бортового АиИО решения тактических задач все элементы деятельности оператора интегрированно представляются в виде ГРО.

Ниже остановимся на возможностях оценки временных затрат оператора в каждой составляющей его деятельности. Информация для этого взята из работ [5—9] и использована в методике оценки реализуемости ГРО [11].

Каждое решение оператора относится к одному из следующих типов: π -решения (перцептивно-опознавательные), ρ -решения (речемыслительные) и π - ρ -решения (эвристические) [5—7, 9].

Каждое π -решение характеризуется мгновенной реакцией оператора на определенный воспринятый им стимул-сигнал. Временные затраты на принятие такого решения состоят только из временных затрат на обнаружение и опознавание оператором соответствующего стимул-сигнала, появляющийся на ИУП кабины Антр/объекта.

Для оценки времени на восприятие информации оператором и на ее осмысливание разработчик ГРО представляет информацию через набор оперативных единиц восприятия (ОЕВ), которые выделяются как элементы конкретного информационного кадра на индикаторе ИУП.

Каждое ρ -решение характеризуется в ГРО входной информацией, включающей в себя состав информации на ИУП кабины, по которой оператор должен принимать это решение; состав и продолжительность речевого сообщения, которое передается кабинным речевым информатором и используется оператором при принятии этого решения. Эта информация описывается:

- числом и составом ОЕВ, по которым оператор принимает решение;
- структурой решения, включающей в себя последовательность элементарных актов выработки решения (ЭАВР), описываемых через символику информационных кадров на индикаторах ИУП.

Каждое π - ρ -решение (эвристическое решение) характеризуется составом информации, по которой экипажу предлагается принять его. Временные затраты оператора на принятие π - ρ -решения определяются только по результатам полунатурного моделирования или/и при натуральных испытаниях Антр/объекта с "реальным экипажем".

Реализация оператором любого принятого решения характеризуется составом и последовательностью его ручных операций, которые можно выполнить на заданном ИУП Антр/объекта.

Каждое речевое сообщение проходит следующие этапы: восприятие экипажем, осмысление полученной информации, принятие решения и совершение необходимых ручных операций. Экспериментальных материалов по оценке временных затрат экипажа на восприятие и осмысление полученной речевой информации в зависимости от числа слов в речевом сообщении и числе его повторов в работах [5—9] не обнаружено. В приведенных ниже примерах факт поступления такого сообщения показывается, а временные затраты экипажа не оцениваются.

Остановимся на участии оператора в операции слежения. В ГРО отмечается последовательность решений, которые должны приниматься оператором при "одновременном" участии его в некотором процессе слежения (например, пилотировании са-

молета летчиком по директорным сигналам). Пусть каждое решение из выделенной последовательности решений охарактеризовано потребным временем τ_i , которое затрачивает оператор на его выработку и реализацию. Примем [11] гипотезу о возможности работы оператора в режиме дискретно-непрерывного слежения.

В этом режиме оператор отвлекается на время

$\sum_{i=1}^k \tau_i$ принятия и реализации одного решения ($k = 1$)

или последовательности ($k > 1$) следующих друг за другом решений. За время отвлечения оператора от режима слежения накапливается некоторая ошибка процесса слежения (начальная ошибка слежения $\varphi_{\text{нач}}$), которую он должен будет устранить при возвращении к процессу слежения. На дугах ГРО помечаются знаком (*) места, где оператор может включаться в процесс слежения. Для выбора из них места фактического включения оператора в операции слежения возникает задача оптимального размещения этих мест по ГРО [12].

Время отработки оператором начальной отметки слежения $\varphi_{\text{нач}}$ существенно зависит от динамических характеристик всех звеньев следящей системы и от навыков работы оператора в этой системе. На этапе системного проектирования спецификаций алгоритмов бортового интеллекта конструкторы не имеют детальной информации обо всем этом. На рассматриваемом этапе можно ориентироваться только на некоторые зависимости времени отработки ($\tau_{\text{отр}}$) накопившейся ошибки $\varphi_{\text{нач}}$ слежения от времени отвлечения оператора от процесса слежения $\tau_{\text{отв}}$, полученные при создании аналогичных Антр/объектов на более поздних стадиях их разработки.

Все названные элементы деятельности оператора объединены концептуальной моделью его поведения, оперативная смена которой оператором в процессе его деятельности требует определенных временных затрат. Это время характеризуется единой величиной для всех концептуальных моделей [9].

3. Граф решений оператора и схема бортовых алгоритмов для решения тактических задач на борту Антр/объекта

На ранних стадиях проектирования бортового АИИО для решения задач I-ГЛУУ и II-ГЛУУ разрабатываются взаимно согласованные спецификации АДЭ и обеспечивающих их БЦВМ-алгоритмов. Спецификации оформляются в виде ГРО и СБА. Чтобы подчеркнуть необходимость их совместной разработки, часто будем использовать обозначения ГРО + СБА. Для Антр/объекта создаются пары ГРО + СБА: одна для I-ГЛУУ и несколько пар (по числу ТС) для II-ГЛУУ.

ГРО представляет собой граф, вершины которого соответствуют составляющим деятельности оператора, а дуги указывают причинно-следственное отношение между этими составляющими. Ниже мы отдельно остановимся на представлении в ГРО операции слежения.

СБА составляется в виде упорядоченного множества БЦВМ-алгоритмов, которые должны вырабатывать информацию, представляемую оператору на ИУП, и принимать сигналы из ИУП, определившись в ГРО. Спецификация БЦВМ-алгоритмов составляется с учетом допустимых структур, как правило, уже освоенных конкретной группой разработчиков бортового АИИО. При этом если допускается использование на борту Антр/объекта БИС-ТЗ, то для АДЭ II-ГЛУУ можно исключить использование оператором π -р-решений. Для АДЭ I-ГЛУУ этого сделать нельзя.

Разработка ГРО + СБА ведется на базе а) соответствующих технических документов типа "Логика работы системы "Экипаж — бортовая аппаратура на I-ГЛУУ", "Логика работы системы "Экипаж — бортовая аппаратура" в ТСХХХ на II-ГЛУУ" или б) только по документам типа "Инструкция экипажу по применению Антр/объекта" с описанием информационной и управляющих частей ИУП по каждой ТС, когда документы перечисленных в пункте а) "Логик..." недоступны.

3.1. Составление графа решений оператора и схемы бортовых алгоритмов

Решение экипажем задач I-ГЛУУ и II-ГЛУУ проводится через последовательность составляющих его деятельности, упорядоченных причинно-следственным отношением.

Разработка ГРО для I-ГЛУУ начинается с определения информации, необходимой экипажу для принятия решения о назначении каждой ТС и определения органов управления на ИУП, позволяющих активизировать бортовое АИИО назначенной ТС. При этом предполагается, что экипаж не участвует в процессах слежения.

Разработку ГРО для задач II-ГЛУУ удобно начинать с анализа ПрС/С. Каждой такой субситуации ставится в соответствие множество возможных (допустимых) способов ее разрешения. Формирование таких множеств выполняется экспертом на основании анализа доступной на борту Антр/объекта информации о внешнем и внутрибортовом мире и характере ПрС/С. Следующим шагом разработки ГРО является выделение из возможных решений предпочтительного или оптимального решения. Часто его можно выделить только после предварительного изучения ПрС/С на соответствующей ей математической модели принятия решения. Выбор предпочтительного решения при составлении ГРО предусматривает одновременное

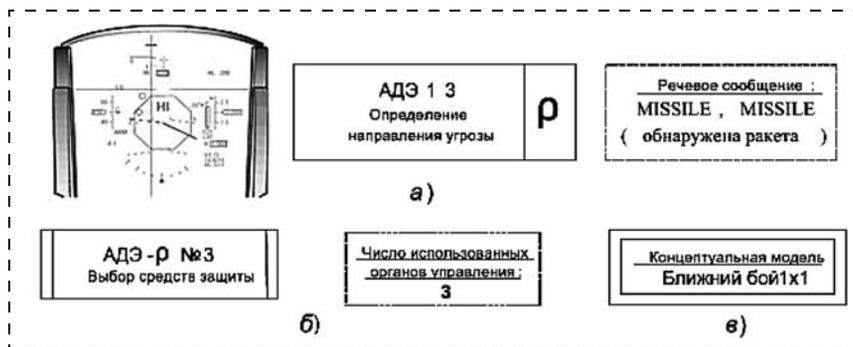


Рис. 2. Обозначение на ГРО вершин:

а — с алгоритмами принятия решений оператором; б — с алгоритмами реализации решения; в — с алгоритмом активизации концептуальной модели поведения оператора

решение проблемы распределения функций между оператором и БЦВМ-алгоритмами.

Если решение тактической задачи/проблемы осуществляется БЦВМ-алгоритмом (БИС-ТЗ), то передача решения на исполнение Б/Исп/Системами происходит только по решению экипажа. При этом экипаж может передать на исполнение все реализуемое решение или только его часть или вовсе отказаться от предлагаемого решения, и это должно обеспечиваться наличием соответствующих органов управления и необходимой информацией на ИУП кабины.

Ориентируясь на структуры БЦВМ-алгоритмов, назначенных для разработки бортового АиИО решения тактических задач, можно оценивать возможность реализации на БЦВМ каждого АДЭ. В этом случае в СБА отмечается наличие такого алгоритма.

Вершины ГРО, отвечающие алгоритмам принятия оператором решения, обозначаются соответствующим прямоугольником, с указанием внутри него типа решения и названия (рис. 2, а). Возле прямоугольника показываются фрагменты информационного кадра индикатора ИУП, по которым принимается это решение, и текст речевого сообще-

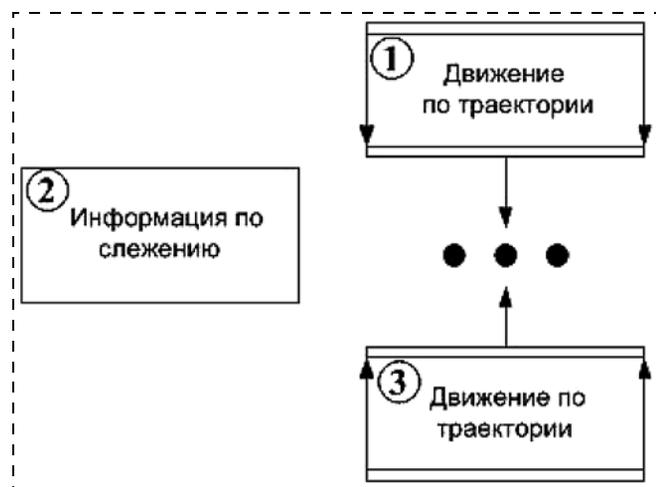


Рис. 3. Обозначение на ГРО участка слежения:

1 — начало участка; 2 — конец участка; 3 — информация оператору для выполнения процесса слежения

ния, относящийся к этому решению. Вершины, соответствующие алгоритмам реализации принятого решения, обозначаются прямоугольником с двойными боковыми сторонами (рис. 2, б). Внутри прямоугольника указывается число органов управления на ИУП, которые используются для реализации решения. Прямоугольником с двойными сторонами на ГРО отмечается смена концептуальной модели поведения оператора (рис. 2, в).

На дугах ГРО специальным образом отмечаются участки, на которых все

элементы деятельности оператора совершаются им на фоне процесса слежения, выполняемого оператором [11]. Начало и конец участка отмечаются соответственно символами "1" и "3" (рис. 3). На этапе начала слежения символом "2" показывается информация, которая используется оператором для реализации процесса слежения.

Одновременно с ГРО разрабатывается соответствующая ему схема бортовых алгоритмов (СБА). В СБА, следуя ГРО, последовательно определяются для каждой вершины ГРО:

- БЦВМ-алгоритмы, в которых вырабатывается информация и речевые сообщения, необходимые для выполнения АДЭ, указанного в этой вершине;
- БЦВМ-алгоритмы, которые воспринимают управляющие сигналы, вырабатываемые в соответствующей вершине ГРО.

Для режима слежения указываются БЦВМ-алгоритмы, в которых должна вырабатываться информация, необходимая оператору для выполнения режима слежения.

Следует отметить, что ГРО и соответствующая ему СБА отличаются по глубине проработки. Если ГРО — это полноценный граф, содержащий алгоритмы деятельности оператора с упорядочением их в соответствии с причинно-следственным отношением, то СБА — это только фрагмент графа, вершины которого — выявленные БЦВМ-алгоритмы, а дуги — возможные фрагменты причинно-следственных отношений этих алгоритмов.

После разработки пары ГРО + СБА для всех ПрС/С анализируемой типовой ситуации осуществляется сборка их в пару ГРО + СБА для всей ТС. На ветках полного ГРО проставляются: предельно допустимое время выполнения всего графа ($T_{\text{граф}}$) и отдельных его фрагментов ($T_{\text{фраг}}$).

По методике работы [11] проводится оценка временных затрат оператора для выполнения всех его АДЭ в каждой ветке полного ГРО.

ГРО, у которых рассчитанные времена не превосходят $T_{\text{граф}}$ и $T_{\text{фраг}}$ вместе с соответствующими им СБА, признаются исходной информацией для

детальной разработки АиИО решения тактических задач П-ГЛУУ.

Примечание. Следует отметить, что расчетная оценка временных затрат оператора на реализацию оператором созданного ГРО возможна только для случая, когда отсутствуют эвристические решения (π -р-решения). Если такие решения существуют, то временные затраты оцениваются на стендах полунатурного моделирования с квалифицированными операторами.

3.2. Пример графа решений оператора и схемы бортовых алгоритмов для антропоцентрического объекта "Истребитель F-16МЗ" в типовой быстрой ситуации "Дальний воздушный бой"

При разработке пары ГРЛ + СБА для этого Антр/объекта доступным является только описание его ИУП, полученного из обзоров [13, 14] и интернет-ресурсов [15]. Ниже представим необходимую нам информацию из этого описания.

Оператором на данном Антр/объекте является "летчик". Ввиду этого наименование ГРО меняет свое название на "граф решения летчика" (ГРЛ). АиИО, выделенное для разработки пары ГРЛ + СБА типовой быстрой ситуации "Дальний воздушный бой" (ТБС ДВБ 1×1), проектируется с ориентировкой только на π - и ρ -решения летчика. Это позволяет провести расчетную оценку временных затрат летчика на реализацию ГРЛ.

3.2.1. Описание информационно управляющего поля истребителя F-16МЗ для ТБС ДВБ 1×1

ТБС ДВБ 1×1 начинается с момента назначения воздушной цели (истребителя противника) на атаку.

В ТБС ДВБ 1×1 имеются пять ПрС/С в ТБС ДВБ 1×1 : "Нападение", "Защита", "Защита с нападением", "Занятие истребителем тактически выгодного положения", "Выход из дальнего боя" [14]. Стоит отметить, что на истребителе F-16МЗ алгоритмически поддерживаются только две из них: "Нападение" и "Защита". Ниже представлены описание ИУП и различные органы управления кабины самолета F-16МЗ, использованные для создания ГРЛ F-16МЗ.

Для ПрС/С необходимо проводить оценку нахождения в конкретном интервале характерных дальностей, а также следить за маневрированием цели, вся необходимая для этого индикация представлена на ИУП (рис. 4). При выводе рекомендации о пуске ракеты необходимо его осуществить по следующему алгоритму:

А) нажать кнопку быстрого выбора ракет AMRAAM на рычаге управления двигателем (РУД);

Б) выполнить маневр так, чтобы директорная метка выдерживания траектории атаки попала в зону допустимых маневров (рис. 4). Проверить вы-

полнение указанных выше условий успешного пуска ракеты;

В) нажать кнопку Weapon Release для самого пуска.

Характерные дальности (рис. 4) обозначают следующее: R_{aero} — максимальная возможная дальность пуска ракеты, рассчитывается в предположении, что цель не маневрирует вообще (вектор текущей скорости цели не будет меняться за все время полета ракеты) и вектор скорости самолета направлен по траектории атаки. При пуске с этой дальности обеспечивается невысокая вероятность поражения цели, однако один такой пуск дает определенное тактическое преимущество; R_{opt} — оптимальная дальность пуска по неманеврирующей цели, которая рассчитывается из условия, что обеспечивается высокая вероятность попадания ракеты в цель, и вектор скорости самолета направлен по траектории атаки; R_{pi} — максимальная дальность пуска по неманеврирующей цели, которая рассчитывается из условия, что обеспечивается высокая вероятность попадания ракеты в цель, и текущий вектор скорости самолета направлен по траектории атаки и выдержан рекомендуемый угол тангажа; R_{tr} — показывает максимальную дальность пуска по цели, выполняющей в момент пуска маневр уклонения "разворот и побег"; R_{min} — это минимальная дальность, пуск с которой может предоставить хоть какой-нибудь шанс на успех атаки. Все расчеты учитывают свое текущее направление движения. Ускорение цели и ее скорость полета принимаются постоянными. Скорость своего борта принимается постоянной в течение промежутка времени от нажатия кнопки "Пуск" до отделения ракеты от борта.

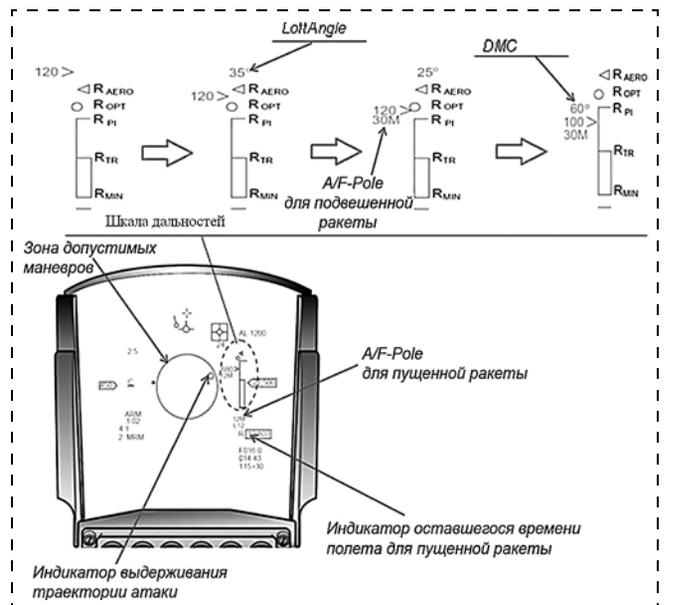


Рис. 4. Индикатор на лобовом стекле (ИЛС). Информация летчику для принятия решения на пуск ракеты типа AMRAAM

Для принятия летчиком эвристического решения о завершении атаки ему на индикатор лобового стекла (ИЛС) выдается информация о значимых событиях в полете ракеты A/F-Pole (рис. 5). Под шкалой дальностей показывается цифробуквенный формуляр.

При обнаружении системой MWS пуска ракеты или ракеты в полете в центре ИЛС появляется восьмиугольник с одной или двумя линиями, проведенными из центра восьмиугольника (направления на первичную угрозу и вторичную угрозу), обозначающими направление угрозы относительно самолета (рис. 5). Наиболее опасная угроза отображается непрерывной прямой линией, исходящей из центра восьмиугольника и уходящей по направлению угрозы. Вторичная угроза, менее опасная на данный момент, отображается в виде штриховой

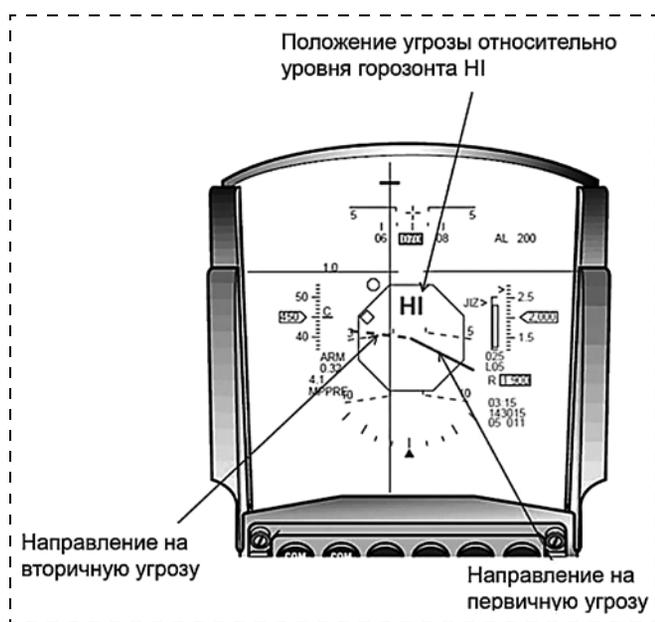


Рис. 5. Индикация об угрозах от системы MWS (система предупреждения об угрожающих ракетах)



Рис. 6. Органы управления (на РУС) постановкой помех противнику

линии, также исходящей из центра восьмиугольника и указывающей на направление угрозы (рис. 5).

Кроме того, при обнаружении угрозы система VMU воспроизводит голосовой сигнал.

После получения голосового сигнала летчику необходимо задействовать средства защиты ECM (систему помех) и выполнить оборонительный маневр.

Выбор программы помех № 1—4 априорно устанавливается перед вылетом, но для эвристического выбора программы предусмотрены соответствующие органы управления на ИУП (рис. 6). Эвристический выбор в документах не регламентируется.

После успешной реализации каждого цикла действий по противодействию ракете (выпуск дипольных отражателей и ИК ловушек) система VMU будет воспроизводить звуковое подтверждение успешного выполнения.

При малом количестве какого-либо расходного средства защиты система VMU воспроизводит голосовую команду "LOW". Расходуемые средства бывают 4 типов: Chaff, Flare, Other 1, Other 2, поэтому команда "LOW" может воспроизвестись до четырех раз.

При полном истощении запаса какого-либо из средств системой VMU воспроизводится голосовой сигнал "OUT". Команда "OUT" будет воспроизводиться четыре раза, если кончились все расходные средства.

3.2.2. Граф решений летчика истребителя F-16M3 в ТБС ДВБ 1 × 1

Для представленного на рис. 7 ГРЛ(F-16M3)-ДВБ 1 × 1 ниже приводится описание работы летчика в ПрС/С "Защита" и "Нападение".

ПрС/С "Нападение" активизируется после проведения проверки об отсутствии сигнала "Пуск ракеты противника". Данная субситуация представлена расширенным числом веток, что обусловлено различными факторами, влияющими на окончательное принятие решения. Первой проверкой возможности пуска является проверка условия $D \leq R_{aero}$, данный факт объясняется невозможностью пуска ракеты с дальностей, превышающих R_{aero} . Успешное удовлетворение условиям $R_{opt} < D \leq R_{aero}$ и отсутствие маневра цели считаются первыми возможными фактами пуска ракеты (ветка № 1). Если исход проверки оказался безрезультатным, то осуществляется переход к проверке о принадлежности текущей дальности интервалу $R_{pi} < D \leq R_{opt}$. При нахождении метки на ИЛС между значениями R_{pi} и R_{opt} (см. рис. 4) необходимо скорректировать угол тангажа самолета на рекомендованное значение угла *LoftAngle* (угол подъема). После исполнения всех перечисленных условий осуществляется пуск ракеты (ветка № 7). Для случая, когда цель маневрирует, необходимо провести с ней сближение до дальности R_{pi} , где положительная принад-

лежность интервалу $R_{Tr} < D \leq R_{pi}$ является одним из условий успешного пуска ракеты. Вторым условием является недопущение превышения текущего угла $DMC_{тек}$ (текущий критический угол отворота) заданного значения, при котором произойдет срыв атаки. При удовлетворении всех условий проводится пуск (ветка № 2). Следующей веткой в ГРЛ, по результатам которой будет выполнен пуск ракеты, является ветка № 3, при нахождении текущей дальности в интервале $R_{min} < D \leq R_{Tr}$. При этом вероятность поражения противника является достаточно высокой. Если по всем проверкам дальности не было принято положительного решения, осуществляется выход из боя (ветка № 4).

ПрС/С "Защита" активизируется в случае наличия оповещения об облучении собственного самолета или пуске ракеты противником. Данная суб-ситуация представлена двумя ветками (№ 5 и 6, рис. 7). Такое разделение обусловлено наличием средств защиты на борту, в случае их отсутствия летчику предьявляется звуковой сигнал "OUT" (отсутствие средств защиты на борту) и выводится рекомендация "Выполнить маневр". Если же средств защиты достаточно, то необходимо активизировать их — провести выбор типа применяемой помехи на РУД (по заранее выбранной программе). Если в ходе выполнения ПрС/С "Нападение" воз-

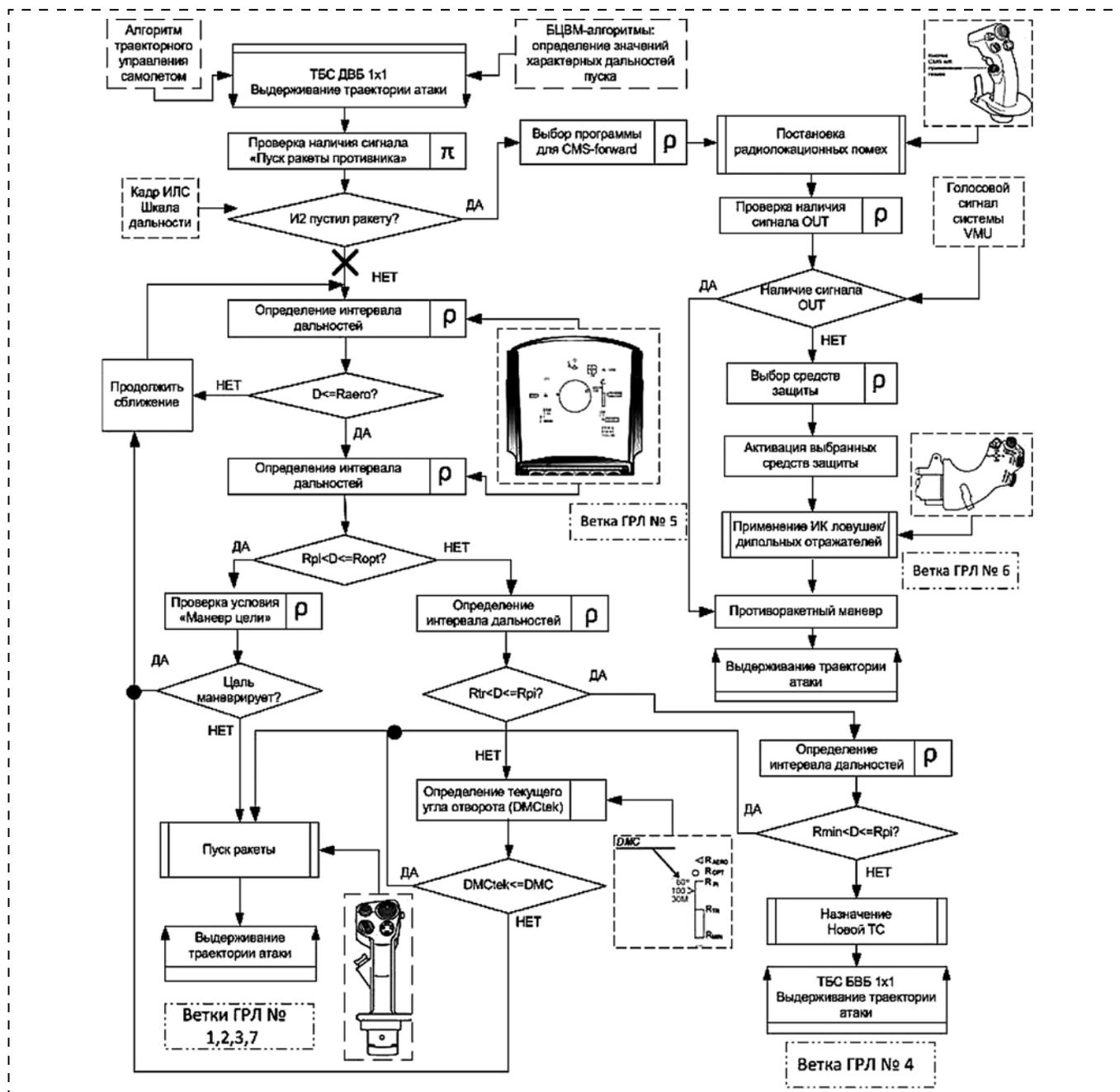


Рис. 7. Граф решений летчика F-16M3 ТБС ДВБ 1 × 1

никает угроза, активизирующая ПрС/С "Защита", то этой ПрС/С отдается приоритет.

Условием окончания ПрС/С "Защита" является факт непопадания атакующей ракеты противника и отсутствие информации о каких-либо угрозах самолету.

3.2.3. Схема бортовых алгоритмов, соответствующая графу решений оператора (F-16M3)-ДВБ 1 × 1

На основе описания ИУП кабины F-16M3 помимо штатных БЦВМ-алгоритмов составляется перечень БЦВМ-алгоритмов, информация с которых поступает на информационные кадры ИУП и зафиксирована в ГРО(F-16M3)-ДВБ 1 × 1 (табл. 1).

Таблица 1

Входные величины БСУ (F-16M3)-ДВБ 1 × 1

Символ на индикаторе	Смысл символа в ГРЛ	БЦВМ-алгоритм
<i>D</i>	Дальность до цели	Штатный БЦВМ-алгоритм
$R_{aero}, R_{opt}, R_{pi}, R_{tr}, R_{min}$	Характерные дальности	БЦВМ-алгоритм "Характерные дальности пуска ракеты"
<i>Loft Angle</i>	Угол вертикальной наводки	БЦВМ-алгоритм расчета угла <i>Loft Angle</i>
<i>DMC</i>	Критический угол отворота	БЦВМ-алгоритм расчета угла <i>DMC</i>
Линия в восьмиугольнике на ИЛС. Речевое сообщение	Сигнал оповещения о пуске ракеты противником	От Борт/Изм/Системы
Речевое сообщение "OUT"	Сигнал "OUT" — оповещение об отсутствии средств защиты	Штатный БЦВМ-алгоритм

4. Блок ситуационного управления — имитатор деятельности оператора при решении им тактических задач

Бортовое АиИО решения задач I-ГЛУУ отрабатывается, как правило, только с экипажем на стендах полунатурного моделирования и в натуральных испытаниях. В отличие от задач I-ГЛУУ, АиИО задач II-ГЛУУ начинает отрабатываться на математических моделях ТС. При этом работа экипажа часто имитируется только фактом принятия определенного решения оператора, без учета временных затрат экипажа на выработку этого решения, выбираемого из заранее составленного списка решений. Возможность принятия решения экипажем только по доступной текущей информации, предъявляемой на ИУП, и реализация принятого решения только через имеющиеся на ИУП органы управления при таком подходе не учитывается. Для ТБС можно разработать блок ситуационного управления БСУ(Антр/объект)-ТБСXXX (под XXX в дальнейшем подразумеваются различные варианты ТБС),

имитирующий работу экипажа при решении тактических задач этой ТБС и свободный от указанных выше недостатков.

Разработка БСУ (Антр/объект)-ТБСXXX (далее часто просто БСУ, если из контекста понятно, о каком Антр/объекте и о какой ТБС идет речь) ведется для следующих типов объектов: проектируемого Антр/объекта, по которому доступна полная техническая документация, и созданного объекта.

В первом случае имеется вся необходимая информация. Во втором случае исходной информацией для разработки БСУ является только описание ИУП с содержательным описанием информационных кадров и с описанием имеющихся на ИУП органов управления.

БСУ создается для тех фрагментов деятельности Антр/объекта, разработка АиИО которых исключает использование экипажем эвристических решений. В настоящее время такими фрагментами являются только разновидности ТС — ТБС. БСУ используется в качестве имитатора деятельности экипажа в имитационных математических моделях ТБСXXX (ИММ ТБСXXX), предназначенных для отработки АиИО решения тактических задач оператором Антр/объекта [см., например, 16]. БСУ позволяет отразить особенность АиИО ТБС и зависимость работы штатных БЦВМ-алгоритмов от сигналов экипажа с ИУП, от сигналов с бортовых измерительных устройств и БЦВМ-алгоритмов.

Для работы БСУ в ИММ ТБСXXX необходима подача на его вход соответствующих сигналов, описывающих содержание символов на информационных кадрах ИУП и содержание речевых сообщений.

Для проектируемого Антр/объекта такие сигналы вырабатываются в ИММ ТБСXXX в штатных БЦВМ-алгоритмах. Под штатными БЦВМ-алгоритмами подразумеваются алгоритмы обработки первичных сигналов от Б/Изм/Системы, а также те БЦВМ-алгоритмы, которые необходимы для работы с Б/Изм/Системами и Б/Исп/Системами.

Для созданных Антр/объектов, по которым доступна только информация по работе на них экипажа, указанные недостающие сигналы поступают из специально разработанного блока имитации бортовых алгоритмов ИБА (Антр/объекта)-ТБСXXX.

В ИММ (Антр/объекта)-ТБСXXX должна вырабатываться текущая информация, которая используется в БСУ. Ориентируясь на состав БЦВМ-алгоритмов, определившихся в СБА (Антр/объект)-ТБСXXX, и семантику соответствующих символов на ИУП этого Антр/объекта, эксперты соответствующей предметной области, имеющие опыт разработки аналогичных алгоритмов, могут создать блок ИБА (Антр/объекта)-ТБСXXX.

Таким образом, в ИММ-ТБСXXX для имитации работы экипажа уже созданного Антр/объекта необходимо присутствие пары БСУ (Антр/объекта)-ТБСXXX + ИБА (Антр/объекта)-ТБСXXX.

5. Пример разработки блока ситуационного управления как математической модели оператора в ТБС ДВБ 1 × 1 истребителя F-16M3

Для разработки БСУ (F-16M3)-ДВБ 1 × 1, описание которого представлено ниже, используются ГРЛ (F-16M3)-ДВБ 1 × 1 + СБА (F-16M3)-ДВБ 1 × 1, которые были описаны в пунктах 3.2.2 и 3.2.3.

5.1. Блок ситуационного управления в ТБС ДВБ 1 × 1 истребителя F-16M3

Особенностями БСУ (F-16M3)-ДВБ 1 × 1 является ранее упомянутое наличие лишь двух ПрС/С "Нападение" и ПрС/С "Защита" и отсутствие эвристических решений (рис. 8). Разделение на ПрС/С "Защита" и "Нападение" происходит при проверке условия — "Оповещение о пуске ракеты противника". Все ветки, описанные в ГРЛ(F-16M3)-ДВБ 1 × 1 (см. п. 3.2.2), разворачиваются в соответствующие им ветки БСУ (F-16M3)-ДВБ 1 × 1, что обозначено на рис. 8 соответствующими номерами.

По каждой ветке БСУ размечаются места оптимального включения летчика в операцию слежения. По методике работы [11] для каждой ветки

Таблица 2

Временные затраты по веткам ГРЛ (F-16M3) — ДВБ 1 × 1

Номер ветки	Временные затраты, с
1	1,97
2	2,84
3	3,08
4	2,34
5	0,54
6	2,22
7	2,6

схемы блока проведена оценка временных затрат летчика на реализацию АДЭ, отмеченных в этой ветке. Результаты расчетов приведены в табл. 2 и проставлены в конце каждой ветки БСУ.

При разработке программной реализации БСУ необходимо учитывать факт наличия "истории" проверок условий, так как при монотонно убывающей дальности результаты проверок принадлежности к интервалам характерных дальностей, пройденные по какой-либо ветке, учитываются при прохождении других веток.

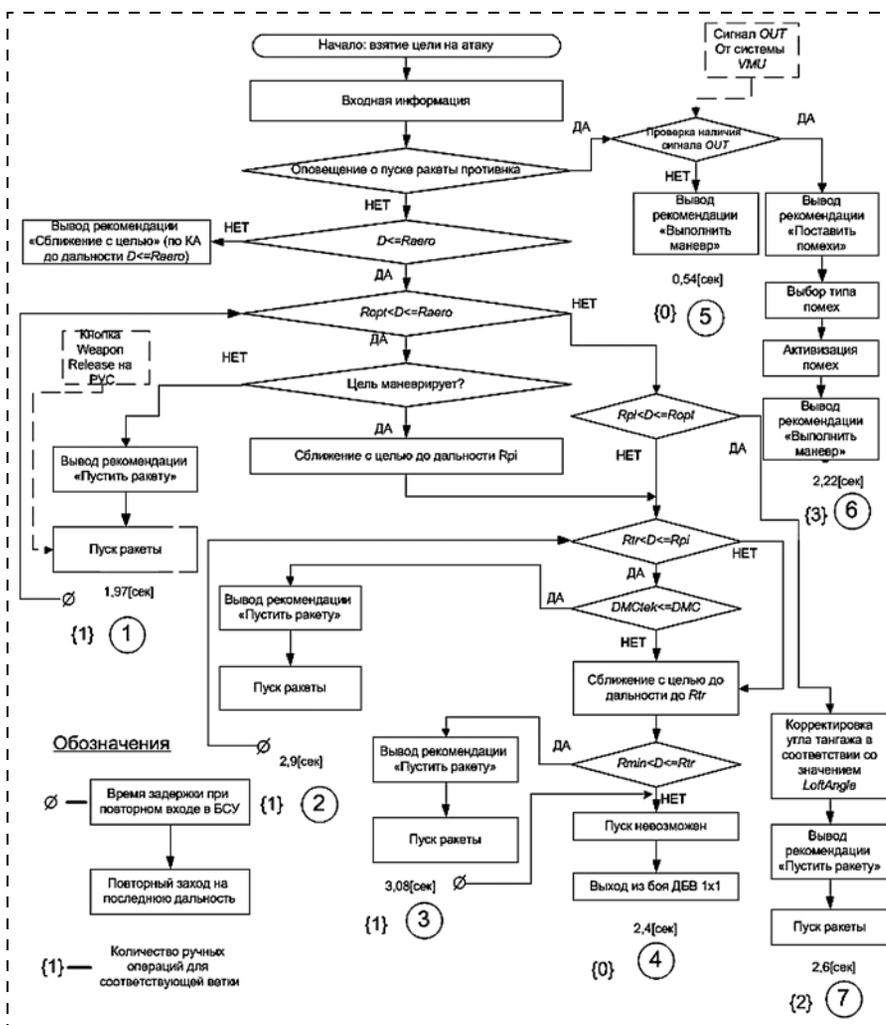


Рис. 8. Блок ситуационного управления F-16M3 ТБС ДВБ 1 × 1

5.2. Блок имитации бортовых алгоритмов для самолета истребителя F-16M3 в ТБС ДВБ 1 × 1

Блок ИБА (F-16M3)-ДВБ 1 × 1 состоит из следующих алгоритмов (рис. 9).

5.2.1. БЦВМ-алгоритм расчета характерных дальностей

Данный алгоритм выдает характерные дальности, использующиеся при назначении цели на атаку. Расчеты всех характерных дальностей проводятся с использованием математической модели ракеты, описанной в работе [15].

5.2.2. БЦВМ-алгоритм определения маневра цели

Данный алгоритм позволяет определить маневр цели. Полученное на вход БЦВМ-алгоритм значение угловой скорости изменения курса цели $\dot{\psi}_{\text{цел}}$ необходимо сравнить с допустимым пороговым значением $|\dot{\psi}_{\text{доп}}|$.

При выполнении условия $|\dot{\psi}_{\text{цел}}| < |\dot{\psi}_{\text{доп}}|$ считается, что цель не маневрирует.

5.2.3. БЦВМ-алгоритм определения угла отворота противника DMC

БЦВМ-алгоритм определяет значение угла отворота DMC.

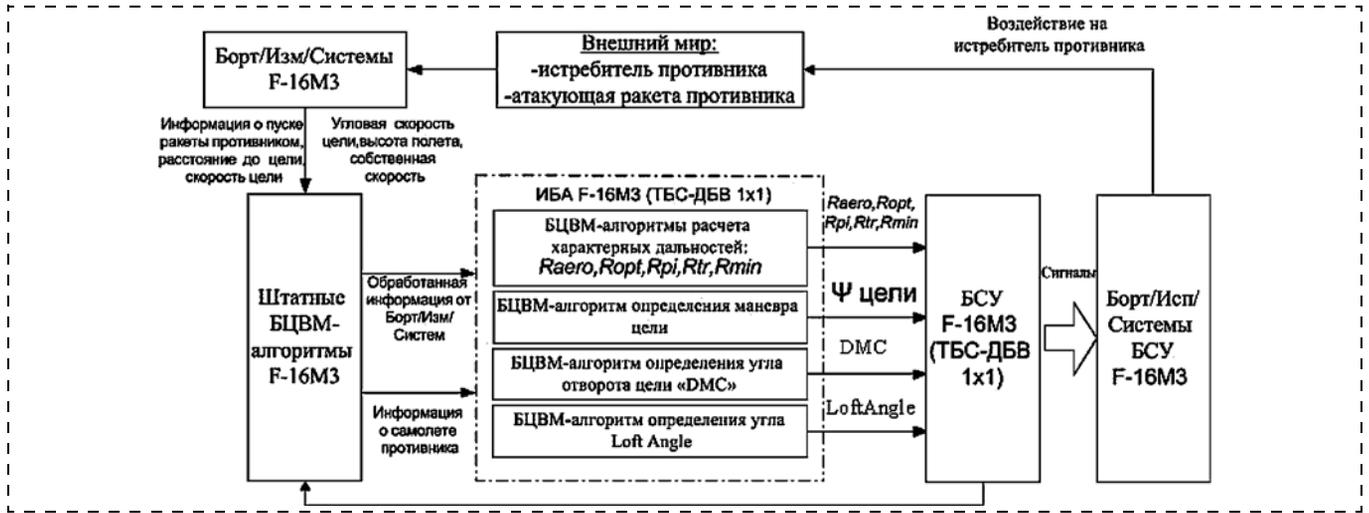


Рис. 9. Блок ИБА (F-16M3)-ДВБ 1 × 1

Имитация основана на получении экспериментальным путем зависимости $DMC = f(D_{pmax})$ угла отворота (DMC) от максимальной дальности пуска с использованием аппроксимирующей математической модели ракеты "воздух—воздух" для расчета в реальном времени характерных дальностей ее полета [18].

5.2.4. БЦВМ-алгоритм определения угла LoftAngle

В алгоритме используется зависимость $LoftAngle$ (угол тангажа F-16M3) = $f(H, V, тип\ ракеты)$. В ИБА (F-16M3)-ДВБ 1 × 1 при моделировании этот алгоритм исключен.

5.3. Работа блока ситуационного управления F-16M3 — ДВБ 1 × 1 и блока имитации бортовых алгоритмов F-16M3 — ДВБ 1 × 1 в имитационной модели ДВБ 1 × 1

Для тестирования и отработки АиИО ТБС ДВБ 1 × 1 создается система имитационного моделирования соответствующей типовой быстрой ситуа-

ции (СИМ-ДВБ 1 × 1) [19], в которой деятельность оператора представляется через БСУ, а имитация работы бортовых алгоритмов осуществляется блоком ИБА [20].

При включении разработанных блоков БСУ и ИБА в имитационную модель ДВБ 1 × 1 были получены следующие результаты (рис. 10, 11). При частоте обращения к БСУ, равной 1 Гц (рис. 10 и рис. 11 верхние графики) показаны временные задержки обращения к БСУ (F-16M3-ДВБ 1 × 1), соответствующие временным затратам летчика на выполнение АДЭ активизированной ветки БСУ. Оси ординат и абсцисс графиков помечены моментами обращения ИММ-ТБС к БСУ. Горизонтальными отрезками на горизонте соответствующего момента обращения к БСУ показаны в масштабе временные затраты летчика на выполнение АДЭ активизированной ветки БСУ. Следующее обращение к БСУ блокируется, пока не истечет время задержки.

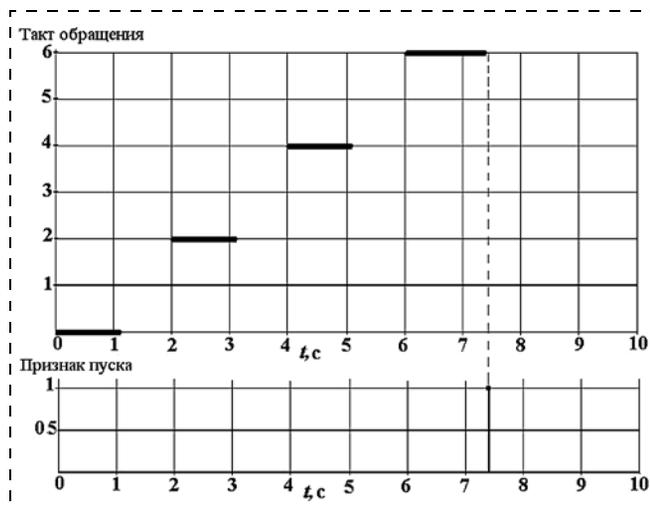


Рис. 10. Временные задержки блока ситуационного управления F-16M3 в имитационной модели ДВБ 1 × 1 (ветка № 4 рис. 8 на временном интервале 0...8 с)

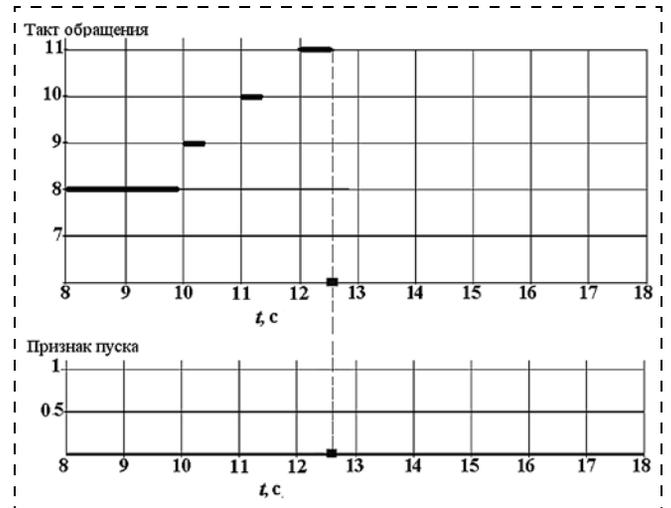


Рис. 11. Временные задержки блока ситуационного управления F-16M3 в имитационной модели ДВБ 1 × 1 (ветка № 4 рис. 8 на временном интервале 8...13 с)

Момент модельного времени $t = 0$ совпадает с началом ДВБ 1×1 , когда $D_{tek} > R_{aero}$. На рис. 10 значение задержек не изменяется до момента времени, равного 6 с, ввиду того, что в БСУ происходит постоянное сравнение $D_{tek} \leq R_{aero}$. Ступенчатый вид обусловлен тем фактом, что обращение к БСУ происходит с частотой 1 Гц. После 6 с наступает временное запаздывание летчика, равное 1,37 с, на однократное выполнение сравнения $R_{opt} < D_{tek}$, и по истечении 1,37 с (7,46 с) от БСУ поступает сигнал о необходимости выполнения пуска собственной ракеты, что показано на нижнем графике в виде присваивания признаку пуска значения, равного 1 (рис. 11).

Графики на рис. 11 отражают ситуацию обращения к БСУ после восьмой секунды модельного времени. Первая временная задержка летчика равна 1,98 с, учитывает в БСУ сравнение D_{tek} со всеми характерными дальностями. В последующем с учетом уже выполненных раньше проверок проводится лишь проверка последнего условия (в данном случае $R_{min} < D_{tek} < R_{tr}$). На момент модельного времени 12,67 с, после проверки всех необходимых условий от БСУ поступает сигнал о рекомендации выхода из ДВБ 1×1 и переменная "признак пуска" принимает значение, равное 0.

Заключение

Бортовое АиИО процесса решения тактических задач I-ГЛУУ, разрабатываемое с ориентировкой на использование экипажем эвристических решений, отрабатывается (моделируется) на стендах полунатурного моделирования, в натуральных испытаниях Антр/объекта и, главным образом, на этапе его опытной эксплуатации. Также отрабатывается АиИО процесса решения задач II-ГЛУУ, но для ТБС возможен предварительный этап — математическое моделирование ТБС.

АиИО процесса принятия экипажем решений в тактических задачах ТБС проектируется инженерами с ориентиром на речемыслительные и перцептивно-опознавательные решения экипажа. Это позволяет разрабатывать для ТБС математическую модель работы экипажа — блок ситуационного управления БСУ(Антр/объект)-ТБСХХХ. Блок имитирует работу экипажа в ТБСХХХ в части решения им тактических задач этой ТБС для определенной версии АиИО и определенного облика ИУП кабины экипажа. В блоке учитывается текущая информация, представляемая экипажу на информационной части ИУП, и использование экипажем только органов управления, имеющих на управляющей части ИУП.

БСУ(Антр/объект)-ТБСХХХ разрабатывается на основе графа решений оператора ГРО(Антр/объ-

ект)-ТБСХХХ и схемы бортовых алгоритмов СБА(Антр/объект)-ТБСХХХ.

БСУ(Антр/объект)-ТБСХХХ предназначен для использования в компьютерных системах имитационного моделирования работы Антр/объекта в ТБС и может использоваться на стендах полунатурного моделирования.

Список литературы

1. Стефанов В. А., Федунов Б. Е. Бортовые оперативно со-ветующие экспертные системы (БОСЭС) типовых ситуаций функционирования антропоцентрических (технических) объектов. М.: Изд-во МАИ, 2006.
2. Федунов Б. Е. Модель "Этап" для разработки облика бор-товых интеллектуальных систем антропоцентрических объек-тов // Онтология проектирования. 2012. № 2 (4). С. 36—43.
3. Желтов С. Ю., Федунов Б. Е. Оперативное целеполагание в антропоцентрических объектах с позиции модели "Этап" // Труды "Четырнадцатой национальной конференции по искус-ственному интеллекту с международным участием", Казань. 2014. Т. 2. С. 35—46.
4. Федунов Б. Е. Проблемы разработки бортовых оператив-но-советующих экспертных систем // Изв. РАН. ТиСУ. 1996. № 5.
5. Основы инженерной психологии / Под ред. Б. Ф. Ломова. М.: Высш. шк., 1977.
6. Введение в эргономику / Под ред. В. П. Зинченко. М.: Сов. Радио, 1974.
7. Заракровский Г. М. Психологический анализ трудовой деятельности. М.: Наука, 1967.
8. Цибулевский И. Е. Человек как звено следящей системы. М.: Наука, 1981.
9. Справочник по инженерной психологии / Под ред. Б. Ф. Ло-мова. М.: Машиностроение, 1982.
10. Hosman R., Stassen H. Pilot's perception in the control of aircraft motions // Control Engineering Practice. 1999. N 7 (11).
11. Федунов Б. Е. Методика экспресс-оценки реализуемости графа решений оператора антропоцентрического объекта на этапе разработки спецификаций алгоритмов бортового интел-лекта // Изв. РАН. ТиСУ. 2002. № 3.
12. Федунов Б. Е. Оптимальные порожденные числовые по-следовательности в задачах размещения участков слежения при оценке алгоритмов деятельности оператора. Ч. I // Изв. РАН. ТиСУ. 2012. № 3. С. 112—135.
13. Федунов Б. Е. Интеллектуальные системы тактического уровня на борту летательных аппаратов: фрагменты их баз знаний (аналитический обзор по материалам зарубежной инфор-мации) / Под общ. ред. акад. РАН Е. А. Федосова. М.: Изд-во НИЦ ГосНИИАС, 2013. 131 с.
14. Федунов Б. Е. Бортовые оперативно советующие экс-пертные системы тактических самолетов пятого поколения (об-зор по материалам зарубежной печати). М.: Изд-во НИЦ Гос-НИИАС, 2002.
15. URL: <http://www.lochedmartin.com/data/assets/aeronautics/products/fl6/F-16/Brochure.pdf> (дата обращения 14.11.2014)
16. URL: http://www.airwar.ru/other/bbl_r/html (дата обра-щения 2.12.2014)
17. URL: <http://www.fas.org.programs/ssp/man/uswpns/air/fighter/fl6/html> (дата обращения 2.12.2014)
18. Дёмкин М. А., Панкратов О. Н., Федунов Б. Е. Аппрок-симирующая математическая модель ракеты "В—В" для расчета в реальном времени характерных дальностей ее полета // Ме-хатроника. 2001. № 9. С. 30—36.
19. Романенко А. В., Федунов Б. Е. Компьютерные системы имитационного моделирования для отработки баз знаний бор-товых интеллектуальных систем системообразующего ядра ан-тропоцентрического объекта // Изв. РАН. ТиСУ. 2010. № 6.
20. Gary R. G. New methods of mathematical modeling of human behavior in the manual tracking task. State University of New York, 2008. P. 7—20.

Mathematical Modeling of the Process for Solving of the Tactical Tasks by a Crew of an Anthropocentric Object

A. V. Smeyukha, annatutta@gmail.com✉,
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation,
B. E. Fedunov, Gosnias, Moscow, 125319, Russian Federation, boris_fed@gosnias.ru

Corresponding author: **Smeyukha Anna V.**, student,
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation,
e-mail: annatutta@gmail.com

Received on April 16, 2015

Accepted on May 12, 2015

The article is devoted to development of algorithms for the onboard indication equipment of the modern anthropocentric objects (manned aircraft, manned submarines, various vehicles and technical systems with operators) using mathematical and hardware-in-the-loop (HIL) scaled-down simulation involving professional operators. The paper demonstrates feasibility of creation of mathematical models (MM) of operator's work in typical combat situations (TC-s) of anthropocentric objects' operating cycle. For each TC its own MM is developed. It consists of two blocks: the onboard algorithm simulation unit (SOA), supplying the determined TC-s information to the information and control field (ICF) of the anthropocentric object cabin and situational control unit (SCU), simulating operator's activity algorithms using only the available current TCS information on ICF and the controls available on it. Anthropocentric object includes such physical systems as onboard measuring systems, onboard executive systems, crewmembers and ICF. The crew is the main element of such a system, and for it SCU is developing. The work describes the joint development procedures in TC: a) operator decision graph (ODG) and onboard algorithms scheme (OAS); b) SOA and SCU based on ODG and OAS. Performance of the proposed approach is demonstrated on the example of the anthropocentric object of F-16M3 Fighter.

Keywords: onboard algorithmic and indication ware, operators decision graph the simulation of onboard algorithms

For citation:

Smeyukha A. V., Fedunov B. E. Mathematical Modeling of the Process for Solving of the Tactical Tasks by a Crew of an Anthropocentric Object, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 9, pp. 604–616.

DOI: 10.17587/mau.16.604-616

References

1. **Stefanov V. A., Fedunov B. E.** *Bortovye operativno sovetujushhie jekspertnye sistemy (BOSJeS) tipovyh situacij funkcionirovaniya antropocentricheskikh (tehnicheskikh) ob'ektov* (Onboard Online Advisory Expert Systems for Typical Situations of Operation of Anthropocentric (Technical) Objects), Moscow, Publishing house of MAI, 2006.
2. **Fedunov B. E.** *Model "Etap" dlja razrabotki oblika bortovyh intellektual'nyh sistem antropocentricheskikh ob'ektov* (Model "Etap" for the development of image-board intelligent systems anthropocentric objects), *Ontologija Proektirovaniya*, 2012, no. 2 (4), pp. 36–43.
3. **Zhel'tov S. Ju., Fedunov B. E.** *Operativnoe celepolaganie v antropocentricheskikh ob'ektah s pozicii modeli "Etap"* (Operational Goal Setting in Anthropocentric Objects from the Viewpoint of the Conceptual Model called Etap: I. Structures of Algorithms for the Support of Crew Decision-Making), *Proceedings of the "Fourteenth National Conference on Artificial Intelligence with International"*, 2014, vol. 2, pp. 35–46.
4. **Fedunov B. E.** *Problemy razrabotki bortovyh operativno-sovetujushchih jekspertnyh sistem* (Problems of the Development of Onboard Real-Time Advisory Expert Systems for Anthropocentric Objects), *Izv. RAN. TiSU*, 1996, no. 5.
5. **Lomov B. F.** ed. *Osnovy inzhenernoj psihologii* (Basics of Engineering Psychology), Moscow, Vysshaya shkola, 1977.
6. **Zinchenko V. P.** ed. *Vvedenie v jergonomiku* (Introduction to Human Engineering), Moscow, Sov. Radio, 1974.
7. **Zarakovskij G. M.** *Psihologicheskij analiz trudovoj dejatel'nosti* (Psychological Analysis of Labor Activity), Moscow, Nauka, 1967.
8. **Cibulevskij I. E.** *Chelovek kak zveno sledjashhej sistemy* (Man is a Part of Tracking System), Moscow, Nauka, 1981.
9. **Lomov B. F.** ed. *Spravochnik po inzhenernoj psihologii* (Reference Book of Engineering Psychology), Moscow, Mashinostroenie, 1982.
10. **Hosman R., Stassen H.** Pilot's perception in the control of aircraft motions, *Control Engineering Practice*, 1999, no. 7 (11).
11. **Fedunov B. E.** *Metodika jekspress-ocenki realizuemosti grafa reshenij operatora antropocentricheskogo ob'ekta na jetape razrabotki specifikacij algoritmov bortovogo intelekta* (Technique of Estimating the Realizability of the Graph of Operator Decisions of an Anthropocentric Object when Designing Algorithms of Onboard Intelligence), Moscow, *Izv. RAN, TiSU*, 2002, no. 3.
12. **Fedunov B. E.** *Optimal'nye porozhdennye chislovye posledovatel'nosti v zadachah razmeshhenija uchastkov slezhenija pri ocenke algoritmov dejatel'nosti operatora* (Optimal Generated Numerical Sequences in Problems of Placement of Tracking Segments in Evaluating Algorithms of Operator Activity), *Izv. RAN, TiSU*, 2012, no. 3, pp. 112–135.
13. **Fedunov B. E.** *Intellektual'nye sistemy takticheskogo urovnja na bortu letatel'nyh apparatov: fragmenty ih baz znaniy* (analiticheskij obzor po materialam zarubezhnoj informacii) (Control System Fighter Weapons: Basics of Multifunctional Aircraft Intelligence), Nauchno-informacionnyj centr GosNIIAS, 2013, 131 p.
14. **Fedunov B. E.** *Bortovye operativno sovetujushhie jekspertnye sistemy takticheskikh samoletov pjatogo pokolenija* (obzor po materialam zarubezhnoj pechati) (Onboard Online Advisory Expert Systems of Fifth Generation Tactical Aircrafts (Survey of Foreign Press)), Moscow, Nauchno-informacionnyj centr GosNIIAS, 2002.
15. **URL:** <http://www.lochedmartin.com/data/assets/aeronautics/products/fl6/F-16/Brochure.pdf> (date of access 14.11.2014)
16. **URL:** http://www.airwar.ru/other/bbl_r/html (date of access 2.12.2014)
17. **URL:** <http://www.fas.org.programs/ssp/man/uswpsn/air/fighter/fl6/html> (date of access 2.12.2014)
18. **Djomkin M. A., Pankratov O. N., Fedunov B. E.** *Approksimirujushhaja matematicheskaja model' rakety "V-V" dlja raschjota v real'nom vremeni harakternyh dal'nostej ejo poljota* (Approximating Mathematical Model of "Air-to-Air" Missile for Real-Time Calculation of Typical Flight Ranges), *Mekhatronika*, 2001, no. 9, pp. 30–36.
19. **Romanenko A. V., Fedunov B. E.** *Komp'yuternye sistemy imitacionnogo modelirovaniya dlja otrabotki baz znaniy bortovyh intellektual'nyh sistem sistemoobrazujushhego jadra antropocentricheskogo ob'ekta* (Computer Simulation Systems for Development of Knowledge Bases of Onboard Online Intelligent Systems of System-Generating Core of Anthropocentric Object), Moscow, *Izv. RAN, TiSU*, 2010, no. 6.
20. **Gary R. G.** *New methods of mathematical modeling of human behavior in the manual tracking task*, State University of New York, 2008, pp. 7–20.

В. И. Потапов, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, ivt@omgtu.ru,
Омский государственный технический университет

Задачи и численные алгоритмы оптимизации надежности аппаратно-избыточной технической системы в конфликтной ситуации при различных стратегиях защиты от атак противника

Поставлены и решены четыре задачи оптимизации надежности аппаратно-избыточной технической системы, участвующей в конфликтной ситуации, при различных стратегиях защиты от нападающей стороны путем соответствующего выбора стратегии защиты путем замещения избыточными резервными блоками отказавших блоков под воздействием атак противника, направленных на увеличение интенсивности их отказов в процессе конфликта. Для решения всех рассмотренных задач разработаны численные алгоритмы, легко реализуемые на современных персональных компьютерах.

Ключевые слова: математическая модель, численный алгоритм, конфликтная ситуация, оптимизация надежности, стратегия защиты

Введение

Известно, что конфликтные ситуации практически в любой сфере деятельности обычно возникают тогда, когда сталкиваются интересы конкурирующих сторон, преследующих, как правило, различные цели. Между ними возникает противоборство, чаще всего в форме негативного воздействия друг на друга, препятствующего достижению собственных интересов (целей) участвующими в конфликте сторонами.

Обычно подобные ситуации имеют место в военном деле, в технических, информационных и вычислительных системах, в бизнесе, в области экономики, да и во многих других областях, включая общественную деятельность, конфликтные ситуации не являются исключением [1–14]. Однако в указанных и многих других известных автору работах, посвященных решению задач в конфликтных ситуациях, решение, как правило, не доведено до численных алгоритмов, что, естественно, затрудняет применение полученных результатов на практике с использованием компьютерной техники. В предлагаемой статье автор попытался устранить указанный недостаток.

В данной работе рассмотрена ситуация, когда в конфликте принимает участие защищающаяся от атак противника сторона, представляющая собой избыточную техническую систему, содержащую основные и резервные блоки, подключаемые вместо отказавших под воздействием атак противника основных блоков для восстановления ее функциональных возможностей в процессе конфликта.

Атакующая сторона в течение конфликта стремится за счет своих средств нападения ослабить атакуемую техническую систему путем целенаправленного воздействия (атаками) на ее функциональные блоки, тем самым увеличивая интенсивность их отказов в течение времени конфликта и уменьшая вероятность безотказной работы атакуемой технической системы.

Для оптимизации вероятности безотказной работы и среднего времени наработки на отказ атакуемой технической системы в процессе конфликта в работе предлагаются модели для решения этих задач при различных стратегиях использования резервных блоков вместо отказавших.

Для решения четырех задач оптимизации надежности рассматриваемой технической системы в процессе конфликта разработаны численные алгоритмы, удобные для реализации на персональных компьютерах.

Математическая модель технической системы, участвующей в конфликтной ситуации

В качестве объекта исследования, участвующего в конфликтной ситуации, выбрана аппаратно-избыточная техническая система $S(n, m, \mathbf{s})$, состоящая из n ($n = n_1 + n_2 + \dots + n_q$) основных и m ($m = s_1 + s_2 + \dots + s_q$) резервных блоков, разбитых на q групп, в каждой из которых находится n_i ($1 \leq i \leq q$) основных и s_i ($1 \leq i \leq q$) резервных блоков. Целочисленный вектор $\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_q)$, соответствующий распределению резервных блоков в q группах, будем называть вектором резервирования. При этом, если после настройки перед началом работы системы

$S(n, m, \mathbf{s})$ распределение m резервных блоков по q группам в течение времени конфликта не изменяется (замены отказавших основных блоков резервными возможны только внутри каждой q группы), то такую техническую систему будем называть системой со статическим резервированием и обозначать $S_C(n, m, \mathbf{s})$.

Если в процессе работы в течение времени конфликта вектор резервирования $\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_q)$ технической системы целенаправленно изменяется для достижения поставленных перед системой целей, т. е. в процессе конфликта выполняется перераспределение m резервных блоков между q группами, сформированными перед началом работы системы в конфликтной ситуации, то такую техническую систему будем обозначать $S_D(n, m, \mathbf{s})$ и называть системой с динамическим резервированием.

Для упрощения модели будем считать, что отказы основных блоков обнаруживаются в моменты их возникновения, а время подключения резервного блока вместо отказавшего пренебрежимо мало и в рассматриваемой модели не учитывается. Будем также полагать, что вероятность отказа системы технической диагностики и подключения резервных блоков в течение времени конфликта пренебрежимо мала, однако при необходимости конечную надежность этой системы в модели можно учесть без особого труда.

Конфликтная ситуация заключается в следующем. Техническая система $S(n, m, \mathbf{s})$ вступает в противоборство с противником, преследующим цель дестабилизировать ее работу, т. е. уменьшить ресурс работоспособности системы и привести к срыву выполнения системой поставленной задачи. С точки зрения теории надежности это интерпретируется как попытка противника уменьшить вероятность безотказной работы участвующей в конфликте системы и, в конечном итоге, привести эту систему к отказу. В качестве средств атаки противник использует свои ресурсы, направленные на увеличение в течение времени конфликта ($0 < t \leq t_f$) интенсивности отказов $\lambda_i(t)$ ($1 \leq i \leq q$) основных блоков и интенсивности отказов $\lambda_0(t)$ не включенных в работу резервных блоков системы, т. е. противник стремится искусственно усилить "старение" технической системы $S(n, m, \mathbf{s})$, приводящее к росту вероятности ее отказа в процессе конфликта. Стратегией атакующего противника является использование соответствующих средств в возможных для него пределах, приводящих к возрастанию интенсивности отказов $\lambda_i(t)$ и $\lambda_0(t)$ основных и резервных блоков защищаемой технической системы. При этом в соответствии с выбранной стратегией нападения атакующий противник выбирает закон возрастания во времени функций интенсивностей

отказов $\lambda_i(t)$ и $\lambda_0(t)$, например от линейного до экспоненциального, по которому атакующий противник будет стремиться увеличивать у защищаемой системы $S(n, m, \mathbf{s})$ в процессе противоборства интенсивности отказов $\lambda_i(t)$ и $\lambda_0(t)$.

В подобной конфликтной ситуации основным ресурсом защиты от атакующего противника у защищаемой системы $S(n, m, \mathbf{s})$ являются резервные блоки, а стратегией защищаемой стороны является оптимальное с точки зрения повышения надежности, т. е. вероятности безотказной работы атакуемой технической системы $S(n, m, \mathbf{s})$, распределение m резервных блоков между q группами для системы $S_C(n, m, \mathbf{s})$ до начала конфликта, а для системы $S_D(n, m, \mathbf{s})$ — до начала и в процессе конфликта.

Очевидно, что чем больше информации о стратегических намерениях атакующей стороны будет у защищаемой стороны, тем лучше можно организовать ее защиту путем выбора оптимальной в конкретных условиях конфликта стратегии защиты из числа стратегий замещения отказавших блоков резервными, рассмотренных в данной статье.

Поведение рассматриваемой технической системы, участвующей в описанной выше конфликтной ситуации, учитывая вероятностный характер процесса, при условии аппроксимации марковским процессом может быть описано по известной методике [15, 16] системой дифференциальных уравнений Колмогорова с переменными коэффициентами. Эта методика будет использована ниже.

Постановка задач оптимизации надежности технической системы $S_C(n, m, \mathbf{s})$ со статическим резервированием в конфликтной ситуации

Для формального описания поведения системы $S_C(n, m, \mathbf{s})$ в процессе конфликта обозначим E_k ($0 \leq k \leq m$) — работоспособное состояние системы с k отказавшими блоками; E_r ($r = m + 1$) — поглощающее состояние, т. е. состояние полного отказа системы; A_k ($1 \leq k \leq m$) — интенсивность перехода системы из состояния E_{k-1} в состояние E_k ; B_k ($1 \leq k \leq m + 1$) — интенсивность перехода системы из состояния E_{k-1} в состояние полного отказа E_r ; $p_k(t)$ ($0 \leq k \leq m + 1$) — вероятность нахождения системы в момент времени t в состоянии E_k . Очевидно, что условие нормировки имеет следующий вид:

$$\sum_{k=0}^{m+1} p_k(t) = 1.$$

Будем полагать, что под воздействием атаки противника каждый резервный блок системы $S_C(n, m, \mathbf{s})$ будет отказывать с интенсивностью $\lambda_0(t)$, а основные блоки, разбитые на q групп, отказывают соот-

ответственно с интенсивностями $\lambda_1(t), \lambda_2(t), \dots, \lambda_q(t)$, причем $\lambda_i(t), 0 \leq i \leq q$, являются функциями времени, возрастающими по закону, выбранному противником для атаки в соответствии с его стратегическими планами в конфликте, и, в частном случае, могут быть одинаковыми, т. е. $\lambda_i(t) = \lambda(t), 0 \leq i \leq q$.

Система дифференциальных уравнений, описывающих поведение рассматриваемой системы $S_C(n, m, \mathbf{s})$, будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} p'_0(t) &= -D_1 p_0(t); \\ p'_k A_k p_{k-1}(t) - D_{k+1} p_k(t), \\ k &= 1, 2, \dots, m; \\ p'_r(t) &= \sum_{k=1}^{m+1} B_k \lambda(t) p_{k-1}(t), \end{aligned} \quad (1)$$

с начальными условиями

$$p_0(0) = 1, p_i(0) = 0, 1 \leq i \leq m.$$

При этом $D_k = A_k + B_k, 1 \leq k \leq m, D_{m+1} = B_{m+1}$.

Коэффициенты системы уравнений (1) вычисляются в соответствии с выражениями

$$A_k = \sum_{i=0}^q \alpha_i(k) \lambda_i(t), k = 1, 2, \dots, m;$$

$$D_k = \sum_{i=0}^q \beta_i(k) \lambda_i(t), k = 1, 2, \dots, m+1,$$

где при $0 \leq k \leq m$ имеет место

$$\alpha_i(k) = \begin{cases} (m-k+1)R_k, & \text{если } i=0, \\ \delta_i n_i R_k, & \text{если } 1 \leq i \leq q; \end{cases}$$

$$\beta_i(k) = \begin{cases} (m-k+1)R_k, & \text{если } i=0, \\ \delta_i n_i R_k + n_i \Theta_i(k), & \text{если } 1 \leq i \leq q; \end{cases}$$

$$\beta_i(m+1) = \delta_i n_i, 1 \leq i \leq q;$$

$$R_k = \binom{n+m}{k}^{-1} R_k^*.$$

Коэффициенты δ_i и $\Theta_i(k)$, являющиеся элементами векторов $\delta = (\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_q)$ и $\Theta(k) = (\Theta_1(k), \Theta_2(k), \dots, \Theta_q(k))$, определяются следующим образом:

$$\delta_i = \begin{cases} 0, & \text{если } s_i = 0, \\ 1, & \text{если } s_i \geq 1; \end{cases}$$

$$\Theta_i(k) = \begin{cases} 0, & \text{если } k \leq s_i, \\ 1, & \text{если } k \geq s_i + 1. \end{cases}$$

Очевидно, что $\Theta_i(1) = 1 - \delta_i$.

Переменная R_k^* определяет число возможных попаданий системы $S_C(n, m, \mathbf{s})$ в состояние E_k и вычисляется [17] по формуле

$$R_k^* = \sum_{\mathbf{v} \in \Omega(k, \mathbf{s})} \prod_{i=1}^q \binom{n_i + s_i}{v_i}, \quad (2)$$

где

$$\Omega(k, \mathbf{s}) = \{\mathbf{v} | v_1 + v_2 + \dots + v_q = k; \forall_i 0 \leq v_i \leq s_i\};$$

$\mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_q)$ — целочисленный вектор, представляющий сумму целочисленных векторов ($\mathbf{v} = \mathbf{x} + \mathbf{z}$), $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_q)$ и $\mathbf{z} = (z_1, z_2, \dots, z_q)$.

Выражение (2) получено в предположении, что k отказов в системе распределились следующим образом: в i -й группе основных блоков — x_i отказов, в i -й группе резервных блоков — z_i отказов ($1 \leq i \leq q$). Если $x_i = 0$ или $z_i = 0$, то в соответствующей группе отказов не было.

Теперь на формальном уровне можно поставить задачу оптимизации вероятности безотказной работы и задачу оптимизации среднего времени безотказной работы участвующей в конфликтной ситуации системы $S_C(n, m, \mathbf{s})$, подвергающейся атаке противника в конфликтной ситуации.

Численное решение задачи оптимизации вероятности безотказной работы технической системы $S_C(n, m, \mathbf{s})$ в конфликтной ситуации

Задача заключается в следующем. В процессе конфликта для заданного времени $t_f > 0$ найти вектор \mathbf{s}^0 , максимизирующий вероятность безотказной работы $P(t_f, \mathbf{s}^0)$ технической системы $S_C(n, m, \mathbf{s})$, описываемой системой уравнений (1), при заданных ограничениях на параметры системы.

Получить точное решение данной задачи не представляется возможным, так как входящие в систему (1) дифференциальные уравнения имеют переменные коэффициенты. Поэтому воспользуемся методом дискретизации для получения приближенного решения.

Для этого вычислим минимальное натуральное число r , удовлетворяющее условиям

$$r \geq 2, \max_{0 \leq i \leq q} \max_{1 \leq v \leq r} \max_{t \in \Delta_v} |\lambda_i(t) - \lambda_{iv}| \leq \varepsilon,$$

где

$$\Delta_v = [t_v - 1; t_v], t_v = v \Delta t, \Delta t = t_f / r,$$

$$\lambda_{iv} = \frac{1}{2} [\lambda_i(t_v - 1) + \lambda_i(t_v)],$$

ε — заданное положительное число, представляющее собой наибольшее допустимое отклонение функ-

ций $\lambda_i(t)$ от констант λ_{iv} на интервалах дискретизации Δ_v для всех $1 \leq v \leq r$.

Очевидно, что $t_0 = 0$, $t_r = t_f$.

Тогда система уравнений (1) распадается на r систем с постоянными коэффициентами для $t \in \Delta_v$:

$$\begin{aligned} p'_{0v}(t) &= -D_{1v}p_{0v}(t); \\ p'_{kv}(t) &= A_{kv}p_{k-1,v}(t) - D_{k+1,v}p_{kv}(t), \quad (3) \\ k &= 1, 2, \dots, m \end{aligned}$$

с начальными условиями

$$p_{kv}(t_v - 1) = \begin{cases} p_k(0) & \text{для } v = 1, \\ p_{k,v-1} & \text{для } 2 \leq v \leq r. \end{cases}$$

Коэффициенты системы дифференциальных уравнений (3) имеют следующий вид:

$$A_{kv} = \sum_{i=0}^q \alpha_i(k)\lambda_{iv}; \quad D_{kv} = \sum_{i=0}^q \beta_i(k)\lambda_{iv}.$$

Решение системы уравнений (3) для $t \in \Delta_v$ может быть записано в следующей форме:

$$p_{0v}(t) = p_{0,v-1}(t_v - 1)\exp(-D_{1v}t); \quad (4)$$

$$\begin{aligned} p_{kv}(t) &= \sum_{j=0}^q p_{j,v-1}(t_v - 1) \times \\ &\times \prod_{i=j+1}^k A_{iv} \sum_{l=j+1}^{k+1} \exp(-D_{lv}t) / \prod_{\substack{i=j+1 \\ i \neq l}}^{k+1} (D_{iv} - D_{lv}), \quad (5) \end{aligned}$$

$$k = 1, 2, \dots, m.$$

Обозначим $S(m)$ — множество $S(m) = \{s | s_1 + s_2 + \dots + s_q = m, \forall_i s_i \geq 0\}$.

Теперь задачу вычисления вектора $\mathbf{s}^0 = (s_1^0, s_2^0, \dots, s_q^0)$, максимизирующего вероятность безотказной работы $P(t_f, \mathbf{s}^0)$ системы $S_C(n, m, \mathbf{s})$, можно решить, используя следующий алгоритм.

АЛГОРИТМ 1

Начало.

1. Задать натуральные числа m, q , массив $\{n_1, n_2, \dots, n_q\}$, функции $\lambda_i(t)$, $0 \leq i \leq q$, массив $\{1, 0, 0, \dots, 0\}$ начальных значений, число $t_f > 0$, число $\varepsilon > 0$.
2. Положить $r = 2$.
3. Вычислить число $\Delta t = t_f/r$ и массив $\{t_0, t_1, \dots, t_r\}$.
4. Положить $i = 0$.
5. Положить $v = 1$.

$$6. \text{ Вычислить } \lambda_{iv} = \frac{1}{2} [\lambda_i(t_{v-1}) + \lambda_i(t_v)].$$

7. Вычислить число

$$\varphi_{iv}^r = \max_{t \in \Delta} |\lambda_i(t) - \lambda_{iv}| = \frac{1}{2} [\lambda_i(t_v) - \lambda_i(t_{v-1})].$$

8. Положить $v = v + 1$.

9. Если $v \leq r$, идти к п. 6.

10. Вычислить число

$$\varphi_i^r = \max_{1 \leq v \leq r} \{\varphi_{iv}^r\}.$$

11. Положить $i = i + 1$.

12. Если $t \leq m$, идти к п. 5.

13. Вычислить число

$$\varphi_i^r = \max_{0 \leq i \leq m} \{\varphi_{iv}^r\}.$$

14. Если $\varphi^r \leq \varepsilon$, идти к п. 17.

15. Положить $r = r + 1$.

16. Идти к п. 3.

17. Задать целочисленный вектор $\mathbf{s} \in S(m)$.

18. Положить $v = 1$.

19. Вычислить $p_{kv}(t_v)$, $0 \leq k \leq m$, по формулам (4) и (5).

20. Положить $v = v + 1$.

21. Если $v \leq r$, идти к п. 19.

22. Вычислить

$$P(t_f, \mathbf{s}) = \sum_{k=0}^m p_{kr}(t_f).$$

23. Выполнить процедуру пп. 17–22 для всех $\mathbf{s} \in S(m)$.

24. Вычислить вектор \mathbf{s}^0 , для которого

$$P(t_f, \mathbf{s}^0) = \max_{\mathbf{s} \in S(m)} P(t_f, \mathbf{s}).$$

25. Конец (\mathbf{s}^0 — искомый вектор резервирования).

Численное решение задачи оптимизации среднего времени безотказной работы технической системы $S_C(n, m, \mathbf{s})$ в конфликтной ситуации

Задача заключается в следующем. Найти вектор \mathbf{s}^1 , максимизирующий среднее время безотказной работы $T(S_C(n, m, \mathbf{s}^1))$ технической системы $S_C(n, m, \mathbf{s})$, описываемой уравнениями (1), при заданных ограничениях на параметры системы.

Для решения данной задачи воспользуемся выражениями (4) и (5), полагая, что конфликтная си-

туация не краткосрочная. Тогда для достаточно больших значений t_f получим

$$T(S_C(n, m, \mathbf{s})) = \int_0^{\infty} P(t) dt \approx \int_0^{t_f} P(t) dt =$$

$$= \sum_{v=1}^r \int_{t_{v-1}}^{t_v} p_v(t) dt = \sum_{v=1}^r \int_{t_{v-1}}^{t_v} \left(\sum_{k=0}^m p_{kv}(t) \right) dt,$$

где $P(t)$ — вероятность безотказной работы системы $S_C(n, m, \mathbf{s})$ в момент времени t .

Обозначив

$$\psi_v = \int_{t_{v-1}}^{t_v} \left(\sum_{k=0}^m p_{kv}(t) \right) dt,$$

имеем

$$T(S_C(n, m, \mathbf{s})) = \sum_{v=1}^r \psi_v.$$

Нетрудно вычислить [16]

$$\psi_v = \frac{p_{0, v-1}(t_{v-1})}{D_{1v}} (\exp(-D_{1v}t_{v-1}) - \exp(-D_{1v}t_v)) +$$

$$+ \sum_{k=1}^m \sum_{j=0}^k p_{j, v-1}(t_{v-1}) \prod_{i=j+1}^k A_{iv} \sum_{l=j+1}^{k+1} (\exp(-D_{lv}t_v - 1) -$$

$$- \exp(D_{lv}t_v)) / D_{iv} \prod_{\substack{i=j+1 \\ i \neq l}}^{k+1} (D_{iv} - D_{lv}). \quad (6)$$

После сделанных преобразований задачу вычисления вектора $\mathbf{s}^1 = (s_1^1, s_2^2, \dots, s_q^1)$, максимизирующего среднее время безотказной работы $T(S_C(n, m, \mathbf{s}^1))$ участвующей в конфликтной ситуации технической системы $S_C(n, m, \mathbf{s})$, можно численно решить с помощью компьютера, используя следующий алгоритм, при условии, что заданы и введены в компьютер все параметры системы (см. п. 1 алгоритма 1).

АЛГОРИТМ 2

Начало.

1. Задать вектор $\mathbf{s} \in S(m)$.
2. Задать $t_f^1 = 1, \varepsilon > 0$.
3. Положить $i = 1, t_f = t_f^1$.
4. Выполнить процедуру пп. 2—21 алгоритма 1.
5. Если $\psi_r < \varepsilon$, идти к п. 9 данного алгоритма.
6. Положить $i = i + 1$.
7. Вычислить $t_f = it_f^1$.
8. Идти к п. 4 данного алгоритма.

9. Вычислить, используя формулу (6),

$$T(S_C(n, m, \mathbf{s})) = \sum_{v=1}^r \psi_v.$$

10. Выполнить процедуру пп. 2—9 данного алгоритма для всех $\mathbf{s} \in S(m)$.
11. Вычислить вектор \mathbf{s}^1 , для которого

$$T(S_C(n, m, \mathbf{s}^1)) = \max_{\mathbf{s} \in S_1(m)} T(S_C(n, m, \mathbf{s})).$$

12. Конец (\mathbf{s}^1 — искомый вектор резервирования).

Первая задача численного решения оптимизации функциональной надежности системы $S_D(n, m, \mathbf{s})$ с динамическим резервированием в конфликтной ситуации

Как указывалось выше, в атакуемой системе $S_D(n, m, \mathbf{s})$ с динамическим резервированием в процессе работы вектор резервирования \mathbf{s} целенаправленно изменяется, т. е. в процессе конфликта в зависимости от атакующих действий противника проводится перераспределение m резервных блоков между q группами, сформированными перед началом работы системы в конфликтной ситуации.

Будем считать, что перераспределение резервных блоков между группами резервирования осуществляется мгновенно по соответствующей команде в определенные моменты времени $\tau_i (i \geq 1)$. Назовем перераспределение резервных блоков настройкой системы $S_D(n, m, \mathbf{s})$, а моменты времени, в которые происходит настройка, — моментами настройки атакуемой технической системы.

Будем полагать, что настройки системы $S_D(n, m, \mathbf{s})$ могут проводиться в заданные моменты времени $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_l (l \geq 1)$, при этом $\tau_0 = 0$.

Требуется определить последовательность векторов резервирования $\mathbf{s}_{\omega}^0 = (s_{1\omega}^0, s_{2\omega}^0, \dots, s_{q\omega}^0)$, $0 \leq \omega \leq l$, максимизирующих вероятность безотказной работы системы $S_D(n, m, \mathbf{s})$ последовательно в заданные моменты настройки и в заданный момент времени $t_f, t_f > \tau_l$.

Получить точное решение данной задачи не представляется возможным. Поэтому для приближенного решения этой задачи воспользуемся методом дискретизации, которым была решена выше аналогичная задача для системы $S_C(n, m, \mathbf{s})$ со статическим резервированием. При этом Алгоритм 1 будем считать базовым для данной и следующей задачи.

Обозначим целочисленное множество

$$S_{\omega} = \left\{ \mathbf{s}_{\omega} \left| \sum_{i=1}^q s_{i\omega} = m - \left[\sum_{k=0}^m k p_{k\omega}(\tau_{\omega}) \right]; s_{i\omega} \geq 0 \right. \right\},$$

где $[*]$ — целое число, ближайшее к данному;

$$\sum_{k=0}^m k p_{k\omega}(\tau_\omega) -$$

— математическое ожидание случайной величины $\varphi(\tau_\omega) = 0, 1, 2, \dots, m$, определяющей число блоков, отказавших к моменту времени τ_ω в системе $S_D(n, m, s)$; $p_{k\omega}(\tau_\omega)$ — вероятность нахождения системы $S_D(n, m, s)$ в момент времени τ_ω в состоянии с k отказавшими блоками. При этом, очевидно,

$$\sum_{k=0}^m p_{k\omega}(\tau_\omega) = 1.$$

Обозначим процедуру пп. 2—24 базового Алгоритма 1 через $\Pi_1(t_f, S)$. Тогда первую рассматриваемую оптимизационную задачу можно решить с помощью следующего алгоритма.

АЛГОРИТМ 3

Начало.

Задать все исходные данные.

1. Положить $\omega = 0$.
2. Выполнить $\Pi_1(\tau_\omega + 1, S_\omega)$ и определить s_ω^0 .
3. Положить $\omega = \omega + 1$.
4. Если $\omega \leq l - 1$, идти к п. 2 данного алгоритма.
5. Выполнить $\Pi_1(t_f, S_l)$.
6. Конец (последовательность настроек $\{s_0^0, s_1^0, \dots, s_l^0\}$ — искомая).

Вторая задача численного решения оптимизации функциональной надежности системы $S_D(n, m, s)$ с динамическим резервированием в конфликтной ситуации

Данная оптимизационная задача является обобщением первой задачи. Очевидно, что за заданное время t_f может быть выполнено конечное число настроек атакуемой системы $S_D(n, m, s)$, не более чем $L (L \geq 1)$.

Требуется определить число настроек $l (l \leq L)$, последовательность $\{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_l\}$ моментов настройки и последовательность векторов резервирования $s_\omega^0 = (s_{1\omega}^0, s_{2\omega}^0, \dots, s_{q\omega}^0)$, отвечающих моментам настройки $\tau_\omega, 1 \leq \omega \leq l$, таким образом, чтобы вероятность безотказной работы системы $S_D(n, m, s)$ в моменты настройки и в момент времени $t_f, t_f > \tau_l$, были последовательно максимальными. При этом, как обычно, $\tau_0 = 0$.

Для решения данной задачи последовательно применим уже известный из предыдущих разделов работы метод дискретизации.

Обозначим $\tau_{l+1} = t_f$ и множество $\Delta_\omega^* = [\tau_{\omega-1}, \tau_\omega], 1 \leq \omega \leq l+1$. Фиксируем ω и для заданного $\varepsilon > 0$ вычисляем натуральное $r(\omega)$. Определение числа ε и процедура вычисления $r(\omega)$ аналогичны определению ε и r , описанному в базовом Алгоритме 1. Затем вычисляем $\Delta t_\omega = (\tau_\omega - \tau_{\omega-1})/r(\omega)$ — интервал дискретизации на множестве Δ_ω^* .

Обозначим $t_v^\omega = \tau_{\omega-1} + v \Delta t_\omega, 0 \leq v \leq r(\omega)$.

Очевидно, что $t_0^\omega = \tau_{\omega-1}$ и $t_{r(\omega)}^\omega = \tau_\omega$.

Обозначим далее $\Delta_{v\omega} = [t_{v-1}^\omega, t_v^\omega]$.

Тогда справедливы следующие равенства:

$$\Delta_\omega^* = \bigvee_{v=1}^{r(\omega)} \Delta_{v\omega}; [0, t_f] = \bigvee_{\omega=1}^{l+1} \Delta_\omega^* = \bigvee_{\omega=1}^{l+1} \left[\bigvee_{v=1}^{r(\omega)} \Delta_{v\omega} \right].$$

Заметим, что для любого ω и любых $v \neq v' \Delta_{v\omega} \cap \Delta_{v'\omega} = \emptyset$, также и для любых $\omega \neq \omega' \Delta_\omega^* \cap \Delta_{\omega'}^* = \emptyset$.

Натуральное число $r(\omega)$ должно удовлетворять следующим условиям:

$$r(\omega) \geq 2,$$

$$\max_{0 \leq i \leq q} \max_{1 \leq v \leq r(\omega)} \max_{t \in \Delta_{v\omega}} |\lambda_i(t) - \lambda_{iv}^\omega| \leq \varepsilon,$$

где

$$\lambda_{iv}^\omega = \frac{1}{2} [\lambda_i(t_{v-1}^\omega) + \lambda_i(t_v^\omega)].$$

Таким образом, ε определяется как наибольшее допустимое отклонение функции интенсивности отказов $\lambda_i(t)$ от констант λ_{iv}^ω на интервалах дискретизации $\Delta_{v\omega}$ для всех $v, 1 \leq v \leq r(\omega)$.

Тогда на Δ_ω^* система уравнений Колмогорова, описывающих рассматриваемую участвующую в конфликте систему $S_D(n, m, s)$ с динамическим резервированием, распадается на $r(\omega)$ систем уравнений с постоянными коэффициентами

$$(p_{0v}^\omega)' = -D_{1v}^\omega p_{0v}^\omega;$$

$$(p_{0v}^\omega)' = A_{kv}^\omega p_{k-1,v}^\omega - D_{k+1,v}^\omega p_{kv}^\omega, \quad (7)$$

$$k = 1, 2, \dots, m,$$

с начальными условиями для $\omega = 1$

$$p_{kv}^1(t_{v-1}^1) = \begin{cases} p_k(0), & \text{если } v = 1, \\ p_{k,v-1}^1(t_{v-1}^1), & \text{если } 2 \leq v \leq r(1), \end{cases}$$

и с начальными условиями

$$p_{kv}^\omega(t_{v-1}^\omega) = \begin{cases} p_{k,r(\omega-1)}^{\omega-1}, & \text{если } v = 1, \\ p_{k,v-1}^\omega(t_{v-1}^\omega), & \text{если } 2 \leq v \leq r(\omega) \end{cases}$$

для $2 \leq \omega \leq l$.

В системе уравнений (7) коэффициенты A_{kv}^{ω} и D_{kv}^{ω} соответственно равны

$$A_{kv}^{\omega} = \sum_{i=0}^q \alpha_i(k) \lambda_{iv}^{\omega},$$

$$D_{kv}^{\omega} = \sum_{i=0}^q \beta_i(k) \lambda_{iv}^{\omega},$$

а величины $\alpha_i(k)$ и $\beta_i(k)$ вычисляются так же, как и в приведенном выше разделе статьи, с той лишь разницей, что коэффициент R_k^* , входящий в формулы, по которым они вычисляются, определяющий число возможных попаданий системы $S_D(n, m, s)$ в состояния с k отказавшими блоками, суммируется по целочисленному множеству

$$S_{\omega-1} = \left\{ s_{\omega-1} \mid \sum_{i=1}^q s_{i, \omega-1} = m - \left[\sum_{k=0}^{m+1} k p_{k, r(\omega-1)}(\tau_{\omega-1}) \right]; s_{i, \omega-1} \geq 0 \right\},$$

где

$$p_{k, r(0)}^0(\tau_0) = p_k(0).$$

Обозначим процедуру пп. 1–16 базового Алгоритма 1 через $\Pi_2(\varepsilon; t_0, t_r)$, а Алгоритм 3 численного решения первой задачи оптимизации функциональной надежности системы $S_D(n, m, s)$ — через $\Pi_3(\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_{l+1})$. Тогда вторую поставленную в данном разделе оптимизационную задачу можно решить с помощью следующего алгоритма.

АЛГОРИТМ 4

Начало.

Задать все исходные данные.

1. Положить $l = 1$.
2. Вычислить $\zeta_l = \Pi_2(\varepsilon, \tau_{l-1}, \tau_{l+1})$.
3. Вычислить $\Delta\tau_l = (\tau_{l+1} - \tau_{l-1})/\zeta_l$.
4. Положить $z = 1$.
5. Вычислить $\tau_l(z) = \tau_{l-1} + z/\Delta\tau_l$.
6. Выполнить $\Pi_3(\tau_{l-1}, \tau_l(z))$.
7. Положить $z = z + 1$.
8. Если $z \leq \xi_{l-1}$, идти к п. 5 данного алгоритма.
9. Вычислить z_l , для которого

$$P(\tau_l(z_l)) = \max_{1 \leq z \leq \xi_{l-1}} P(\tau_l(z)).$$

10. Положить $\tau_l = \tau_l(z_l)$ и запомнить s_{l-1}^0 и s_l^0 .
11. Положить $l = l + 1$.

12. Если $l \leq L$, идти к п. 2 данного алгоритма.

13. Конец ($\{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_L\}$ и $\{s_0^0, s_1^0, \dots, s_L^0\}$ — искомые последовательности).

Заключение

Рассмотренные в статье задачи оптимизации надежности технической системы в конфликтной ситуации при различных стратегиях использования избыточных резервных блоков вместо отказавших для защиты от атак противника и разработанные численные алгоритмы для решения этих задач легко реализуются на профессиональных ПЭВМ и позволяют оперативно находить оптимальное распределение резервных блоков в атакуемых технических системах $S_C(n, m, s)$ и $S_D(n, m, s)$, гарантирующее этим системам оптимизацию функциональной надежности в конфликтной ситуации.

Список литературы

1. Саати Т. Математические модели конфликтных ситуаций. М.: Сов. радио, 1977. 304 с.
2. Петросян Л. А., Зенкевич Н. А. Оптимальный поиск в условиях конфликта. Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. 77 с.
3. Горелик В. А., Горелов М. А., Конonenko А. Ф. Анализ конфликтных ситуаций в системах управления. М.: Радио и связь, 1991. 288 с.
4. Aubin Y. Optima and Equilibria. B.: Springer, 1993. 417 p.
5. Theodore L. Turocy, Bernhard von Stengel. Game Theory. Texas A & M University, London School of Economics, 2001. 39 p.
6. Данилов Н. Н. Теоретико-игровое моделирование конфликтных ситуаций. Томск: Изд-во ТГУ, 2005. 445 с.
7. Выпасняк В. И. Моделирование вооруженного противоборства: перспективы развития // Военная мысль. 2009. № 7. С. 12–21.
8. Галаев А. А., Маслов Е. П., Рубинович Е. Я. Об одной задаче управления движением объекта в конфликтной среде // Известия РАН. Теория и системы управления. 2009. № 3. С. 134–140.
9. Куливец С. Г. Моделирование конфликтных ситуаций с несогласованными представлениями у агентов на основе игр на линейных когнитивных картах // Проблемы управления. 2010. № 4. С. 42–48.
10. Губанов Д. А., Новиков Д. А., Чхартишвили А. Г. Социальные сети: модели информационного влияния, управления и противоборства. М.: Физматлит, 2010. 244 с.
11. Flesch Y., Schoenmakers G., Vrieze O. J. Loss of skills in coordination games // Int. J. Game Theory. 2011. N 40. P. 769–789.
12. Добровидов А. В., Кулида Е. А., Рудько И. М. Выбор траектории движения объекта в конфликтной среде // Проблемы управления. 2011. № 2. С. 64–75.
13. Сергеев С. М. Антагонистические дифференциальные игры в задачах моделирования коммерческих сетей // Вестник ТГУ. 2012. Т. 17. Вып. 3. С. 872–874.
14. Потапов В. И. Математическая модель и алгоритм оптимального управления подвижным объектом в конфликтной ситуации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 7. С. 16–22.
15. Вентцель Е. С. Исследование операций. М.: Сов. радио, 1972. 550 с.
16. Козлов Б. А., Ушаков И. А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М.: Сов. радио, 1975. 472 с.
17. Потапов В. И., Братцев С. Г. Новые задачи оптимизации резервированных систем. Иркутск: Изд-во Иркут. Ун-та, 1986. 112 с.

Tasks and Numerical Algorithms for Optimization of Reliability of the Hardware-Redundant Technical Systems in a Conflict Situation under Different Strategies for Protection Against Enemy Attacks

V. I. Potapov, ivt@omgtu.ru✉,
Omsk State Technical University, Omsk, 644050, Russian Federation

Corresponding author: Potapov Victor I., D. Sc, Professor,
Head of Department of Informatics and Computer Engineering,
Omsk State Technical University, Omsk, 644050, Russian Federation, e-mail: ivt@omgtu.ru

Received on January 29, 2015

Accepted on April 23, 2015

The subject of the article is the situation when a side in a conflict, defending itself from the enemy attacks, is a hardware-redundant technical system, containing the main and standby units, which can be involved for recovery of its functionality in the process of a conflict in accordance with the chosen protection strategy instead of the main units, which failed under the impact of the enemy attacks. During a conflict the attacking side with its attack resources tries to weaken the targeted technical system by focusing its attacks on the functional units, increasing their failure rate during the period of the conflict and thus reducing the faultless operation and average uptime of the targeted technical system. Given the probabilistic character of the process, the behavior of the considered technical system involved in a conflict situation is approximated by Markov process and is described by Kolmogorov system of differential equations with variable coefficients. For solving of these equations the method of discretization and integer programming is used. The essence of this method, applied to the considered problem, is that the system of differential equations describing the behavior of a technical system in a conflict situation, the coefficients of which are functions of time, should be replaced by a system of discrete analogues, the coefficients of which can be considered constant with a predetermined degree of accuracy at discrete time intervals during the conflict. In order to optimize the reliability function and average time before a failure of the defender hardware-redundant technical systems in the process of the conflict, the author in this work proposes mathematical models for solving of these problems under different strategies for the use of the reserve units instead of the faulty ones. These strategies boil down to a targeted redundant power distribution between the main units of the technical system prior to the beginning of a conflict and dynamic reallocation of them in the process of conflict for achievement of the tasks, set before the technical system in a confrontation with the enemy. For implementation of these strategies the author proposes a method for computing of the corresponding vectors of redundancy and sequence of moments of redistribution of the reserve units between the main ones in the process of a conflict. Numerical algorithms were developed for solving of four problems of optimization of reliability of the considered technical system in the process of the conflict by selection of an appropriate backup strategy, convenient for implementation with the help of modern personal computers.

Keywords: mathematical model, numerical algorithm, conflict situation, optimization of reliability, protection strategy

For citation:

Potapov V. I. Tasks and Numerical Algorithms for Optimization of Reliability of the Hardware-Redundant Technical Systems in a Conflict Situation under Different Strategies for Protection Against Enemy Attacks, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 9, pp. 617–624.

DOI: 10.17587/mau.16.617-624

References

1. Saati T. *Matematicheskie modeli konfliktnykh situatsii* (Mathematical models of conflict situations), Moscow, Sov. radio, 1977, 304 p.
2. Petrosyan L. A., Zenkevich N. A. *Optimal'nyi poisk v usloviyakh konflikta* (Optimal search in conflict), Leningrad, Publishing house of Leningrad state University, 1987, 77 p.
3. Gorelik V. A., Gorelov M. A., Kononenko A. F. *Analyz konfliktnykh situatsii v sistemakh upravleniya* (The analysis of conflict situations in management systems), Moscow, Radio and communication, 1991, 288 p.
4. Aubin Y. *Optima and Equilibria*. B.: Springer, 1993, 417 p.
5. Theodore L. Turocy, Bernhard von Stengel. *Game Theory*. Texas A & M University, London School of Economics, 2001, 39 p.
6. Danilov N. N. *Game-theoretic modeling of conflict situations*, Tomsk, Publishing house of TSU, 2005, 445 p.
7. Wypasek V. I. Modeling of armed conflict: prospects, *Military Thought*, 2009, no. 7, pp. 12–21.
8. Galaev A. A., Maslov E. P., Rubinovich E. Y. A problem of motion control of an object in a conflict environment, *Izv. Theory and Control Systems*, 2009, no. 3, pp. 134–140.
9. Culiver S. G. Modeling of conflict situations with inconsistent performances from agent-based games on a linear cognitive maps, *Problems of Management*, 2010, no. 4, pp. 42–48.
10. Gubanov D. A., Novikov D. A., Chkhartishvili A. G. *Social networks: models of information influence, control and conflict*, Moscow, Fizmatlit, 2010, 244 p.
11. Flesch Y., Schoenmakers G., Vrieze O. J. Loss of skills in co-ordination games, *Int. J. Game Theory*, 2011, no. 40, pp. 769–789.
12. Dobrovidov A. V., Kulida E. A., Rudko I. M. Choice of a trajectory of the object in conflict, *Problems of Management*, 2011, no. 2, pp. 64–75.
13. Sergeev S. M. Antagonistic differential game modeling commercial networks, *Vestnik TSU*, 2012, vol. 17, iss. 3, pp. 872–874.
14. Potapov V. I. Mathematical model and algorithm of optimal control of a movable object in a conflict situation, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 7, pp. 16–22.
15. Wentzel E. S. *Operations Research*, Moscow, Sov. radio, 1972, 550 p.
16. Kozlov B. A., Ushakov I. A. *Guide for the calculation of reliability of radio electronics and automation*, Moscow, Sov. radio, 1975, 472 p.
17. Potapov V. I., Brothers S. G. *New optimization problem of redundant systems*, Irkutsk, Publishing house of Irkut. University press, 1986, 112 p.

С. Г. Герман-Галкин, д-р техн. наук, проф., ggsg@yandex.ru,

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики "ИТМО", Морская академия, г. Щецин, Польша,

А. В. Бормотов, аспирант, art_b02@mail.ru,

Санкт-Петербургский Балтийский государственный технический университет им. Д. Ф. Устинова "Военмех"

Аналитическое и модельное исследование модульной синхронной реактивной машины в системе электропривода

Представлены результаты исследований и модельных испытаний синхронной реактивной машины модульной конструкции. Выделен ряд положительных аспектов практической реализации данной конструкции и отличительные особенности ее математического описания. Рассмотрен алгоритм расчета параметров элементарного модуля машины и создана компьютерная модель электропривода в пакете MATLAB-Simulink, подтвердившая заложенные при проектировании предельные характеристики машины.

Ключевые слова: модульная конструкция, вентильная синхронная реактивная машина, математическая модель, компьютерная модель, пакет MATLAB-Simulink, пакет Ansys Maxwell, электропривод

Введение

Начиная с 60-х годов прошлого века для устранения недостатков традиционных конструкций электрических машин осуществляется переход на новые конструкции [1–3]. Эти машины, включенные в замкнутую систему по положению ротора, названы вентильными электрическими машинами (ВЭМ).

Такие конструкции позволяют выполнить статорные обмотки сосредоточенными и значительно сократить пути замыкания магнитного потока. Как показывают исследования последних лет [4–14], такие конструкции позволяют существенно улучшить энергетические характеристики, уменьшить массу и габаритные размеры электрических машин. Применение такого подхода подразумевает отказ от традиционных путей конструктивного решения и реформирование устоявшихся взглядов относительно проектирования электрической машины для электропривода.

1. Конструкция модульной синхронной реактивной машины

Идея создания модульной электрической машины (МЭМ) была запатентована в работе [15]. Два последующих конструктивных решения запатентованы в работах [16, 17]. Одна из конструкций МЭМ подробно описана и исследована в работах [18, 19].

Модульная конструкция электрической машины позволяет:

- максимально сократить длину магнитных линий и, соответственно, падение магнитного потенциала на пути замыкания магнитного потока;

- исключить лобовые части обмоток в машине;
- соответствующей группировкой катушек реализовать в одной конструкции различные машины, обмотки фаз которых рассчитаны на ряд напряжений и токов;
- реализовать в одной конструкции 2-, 3- и m -фазную обмотки;
- наращивать габаритную мощность машины в радиальном и осевом направлениях без изменения конструкции электромагнитного модуля;
- в зависимости от конструкции подвижных и неподвижных частей и способа соединения обмоток электромагнитных модулей сконструировать линейную или вращающуюся электрическую машину.

Проведенные исследования [18, 19] и испытания данной машины позволили выявить следующие особенности:

1. Для определения параметров машины необходимо рассчитывать магнитные поля с использованием современных специализированных компьютерных пакетов конечно-элементного анализа (КЭА) в трехмерной постановке задачи, например Ansys Maxwell, применение которого позволяет с высокой точностью аппроксимировать любую геометрию модулей электрической машины и учесть нелинейные свойства ферромагнитных материалов [18, 20].

2. Отсутствует возможность аналитического представления параметров машины и, соответственно, аналитического описания ее статических и динамических свойств.

3. Необходимо рассматривать характеристики машины совместно с системой управления, так как алгоритм управления влияет на параметры самой машины.

4. Для обеспечения минимума пульсаций электромагнитного момента требуется особая коммутация токов в обмотках, обеспечивающая перекрытие их в фазах в начале и конце импульса.

5. Изменение индуктивности фаз аппроксимируется гармонической зависимостью.

6. Практически отсутствует магнитная связь между сердечниками модулей различных фаз.

Проектирование машины, осуществляемое в пакете Ansys Maxwell, позволило создать конструкцию, представленную на рис. 1 (см. третью сторону обложки). Эта машина названа модульной синхронной реактивной машиной (МСРМ).

МСРМ состоит из отдельных электромагнитных модулей. Электромагнитные модули размещены на неподвижных частях, выполненных из немагнитного материала. Каждый электромагнитный модуль содержит два П-образных сердечника, расположенных торцами зубцов друг к другу так, что полюсы ротора, установленного между сердечниками, совпадают в проекции с торцами зубцов этих сердечников. Обмотки в электромагнитном модуле выполнены раздельно на каждом зубце П-образного сердечника, расположенном дальше от вала. Электромагнитные модули закреплены по окружности без радиального смещения сердечников друг относительно друга, при этом обмотки одной фазы могут соединяться последовательно, параллельно или в последовательно-параллельные группы. Ротор МСРМ выполнен в виде зубцово-пазовой конструкции из ферромагнитного материала. Представленная конструкция реализована в макетном варианте и испытана в статическом режиме на кафедре "Мехатроники и робототехники" Балтийского государственного технического университета им. Д. Ф. Устинова "Военмех". Параметры машины приведены ниже:

Число модулей	18
Число фаз	3
Средний момент, Н·м	100
Максимальная скорость (расчетная), рад/с	200
Масса, кг	35
Напряжение питания, В	50...600
Средний ток обмотки модуля, А	7

2. Математическое описание модульной синхронной реактивной машины

При составлении математического описания электромагнитных процессов m -фазной МСРМ, следует, прежде всего, определиться, какие из трех переменных состояния (ψ — потокосцепление, i — ток, θ_m — угол смещения между полюсами статора и ротора) необходимо выбрать как независимые [3]. Обычно в качестве независимых переменных состояния выбираются ток и угол смещения между полюсами статора и ротора (i, θ_m). В этом случае

уравнения электрического равновесия в машине можно представить в виде системы из m уравнений Кирхгофа, записанных для каждой фазы [3]:

$$u_k = r_k i_k + \frac{d\psi_k(i_k, \theta_m)}{dt}, \quad (1)$$

где u_k — напряжение, приложенное к k -й фазе; r_k — сопротивление k -й фазы; i_k — ток, протекающий в k -й фазе; ψ_k — потокосцепление k -й фазы; θ_m — механический угол поворота ротора. Уравнения механического равновесия запишутся на основании второго закона Ньютона:

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = \sum_{k=1}^m T_{ek}(i_k, \theta_m) - T_l, \quad (2)$$

где $\sum_{k=1}^m T_{ek}(i_k, \theta_m)$ — результирующий электромагнитный момент от действия всех m фаз; T_l — момент нагрузки, приложенный к валу машины.

Представим математическую модель машины в функции индуктивности обмотки статора. Для получения этой зависимости преобразуем производную от потокосцепления по формуле

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_k(i_k, \theta_m)}{dt} &= \frac{d[L_k(i_k, \theta_m)i_k]}{dt} = \\ &= L_k(i_k, \theta_m) \frac{di_k}{dt} + \frac{dL_k(i_k, \theta_m)}{dt} i_k. \end{aligned} \quad (3)$$

Производная от индуктивности k -й обмотки L_k , являясь неявной функцией времени, находится из уравнения

$$\frac{dL_k(i_k, \theta_m)}{dt} = \frac{\partial L_k(i_k, \theta_m)}{\partial \theta_m} \frac{d\theta_m}{dt} = \frac{\partial L_k(i_k, \theta_m)}{\partial \theta_m} \omega_m. \quad (4)$$

Из уравнений (1), (3), (4) получим

$$u_k = r_k i_k + L_k(i_k, \theta_m) \frac{di_k}{dt} + \frac{\partial L_k(i_k, \theta_m)}{\partial \theta_m} \omega_m i_k. \quad (5)$$

Умножим уравнение (5) на ток обмотки:

$$u_k i_k = r_k i_k^2 + L_k(i_k, \theta_m) \frac{di_k}{dt} i_k + \frac{\partial L_k(i_k, \theta_m)}{\partial \theta_m} \omega_m i_k^2. \quad (6)$$

В уравнении (6) левая часть представляет собой электрическую мощность, потребляемую обмоткой. Первое слагаемое правой части — это потери в обмотке, второе — электромагнитная мощность в обмотке, третье — механическая мощность на валу машины. Разделив механическую мощность на угловую скорость, получим электромагнитный момент, создаваемый k -й обмоткой:

$$T_{ek}(i_k, \theta_m) = \frac{\partial L_k(i_k, \theta_m)}{\partial \theta_m} i_k^2. \quad (7)$$

Полное математическое описание МСРМ, полученное из уравнений (2), (5), (7), запишется в виде

$$\begin{aligned} \frac{di_k}{dt} &= \frac{1}{L_k(i_k, \theta_m)} \left(u_k - r_k i_k - \frac{\partial L_k(i_k, \theta_m)}{\partial \theta_m} \omega_m i_k \right); \\ \frac{d\omega_m}{dt} &= \frac{1}{J} \left(\sum_{ek=1}^m T_{ek}(i_k, \theta_m) - T_l \right); \\ \frac{d\theta_m}{dt} &= \omega_m. \end{aligned} \quad (8)$$

Уравнения (8) представляют собой систему нелинейных дифференциальных уравнений. Для ее решения необходимо знать зависимости параметров машины от ее переменных состояния $L_k(i_k, \theta_m)$, $\frac{\partial L_k(i_k, \theta_m)}{\partial \theta_m}$.

Поскольку в рассматриваемой конструкции отсутствует взаимодукация между отдельными модулями, то зависимости $L_k(i_k, \theta_m)$, $\frac{\partial L_k(i_k, \theta_m)}{\partial \theta_m}$ могут быть получены при расчете и анализе магнитного поля отдельно взятого модуля.

Расчет поля в электромагнитном модуле (рис. 2, см. третью сторону обложки) не удается свести к решению двумерной задачи. Для расчета магнитного поля в трехмерной постановке используется метод конечных элементов (МКЭ) программного продукта Ansys Maxwell [18, 20].

Основными этапами расчета электромагнитного поля и индуктивности электромагнитного модуля рассматриваемой модульной машины в 3D постановке являются:

1. Выбор типа решаемой задачи.
2. Построение геометрии магнитопровода (подвижных, неподвижных частей) и катушек.
3. Назначение свойств материалов модели.
4. Формирование граничных условий.
5. Формирование обмоток, задание тока в обмотках.
6. Формирование и генерация сетки конечных элементов.
7. Проведение расчета.
8. Визуализация и анализ результатов.

Результаты расчета электромагнитного поля модуля в рассогласованном и согласованном состояниях представлены на рис. 3 (см. третью сторону обложки).

Уравнение (7) показывает, что знак момента, а значит, и режим работы машины определяются знаком производной индуктивности по углу. При положительной производной машина развивает положительный момент, т. е. работает в двигательном режиме. При отрицательной производной машина развивает отрицательный момент и работает в генераторном режиме. Поэтому формирование тока

в фазе машины необходимо согласовывать с режимом работы машины и зависимостью $L_k(i_k, \theta_m)$.

Изменение индуктивности $L_k(i_k, \theta_m)$ в фазе имеет периодический характер, при этом период повторения определяется числом полюсов ротора. Для трехфазной МСРМ с 18 модулями на статоре и 12 полюсами на роторе период повторения равен $360^\circ/12 = 30^\circ$. Приблизительная зависимость индуктивности фазы "а" двигателя от угла поворота ротора и алгоритм формирования тока в этой фазе для рассматриваемой машины представлены на рис. 4.

Угол включения (Угол вкл.) и выключения (Угол выкл.) за счет датчика положения ротора устанавливается таким образом, чтобы ток в двигательном режиме работы формировался на участке возрастания индуктивности.

Реальные зависимости $L_a(i_a, \theta_m)$ в диапазонах изменения угла поворота ротора θ_m от 15° до 30° и тока i_a от 2 до 14 А, рассчитанные для одного модуля (рис. 2) фазы "а", показаны на рис. 5. Аналогичные зависимости, смещенные, соответственно, на 10° и 20° , имеют место для фаз "в" и "с".

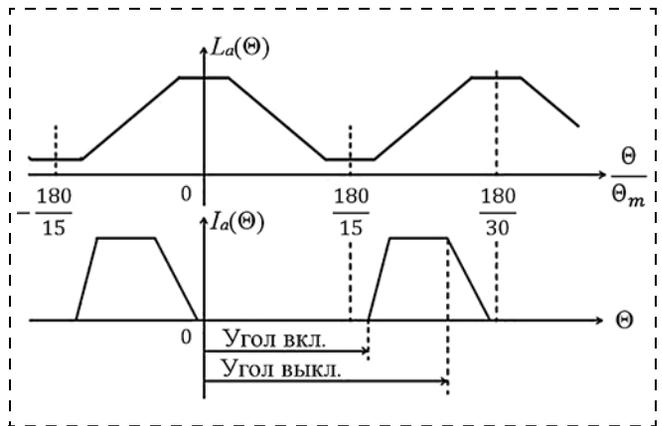


Рис. 4. Приблизительная зависимость индуктивности фазы от угла поворота ротора и алгоритм формирования тока в фазе двигателя

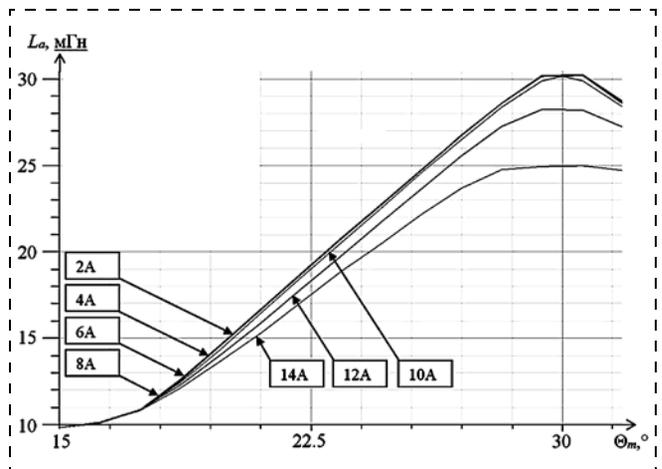


Рис. 5. Реальные зависимости $L_a(i_a, \theta_m)$ одного модуля в диапазонах изменения $\theta_m = 15...30^\circ$ и $i_a = 2...14$ А

3. Построение структурной модели электропривода с модульной электрической машиной в пакете Simulink [21–25]

Первоначально рассмотрим зависимости параметров машины $L_k(i_k, \theta_m)$, $\frac{\partial L_k(i_k, \theta_m)}{\partial \theta_m}$ от ее переменных состояния. Эти зависимости на основании расчетных данных (рис. 5) можно выразить приближенными уравнениями:

$$L_k(i_k, \theta_m) = \frac{L_{\max}(i_k) + L_{\min}}{2} + \frac{L_{\max}(i_k) - L_{\min}}{2} \cos z_2 \theta_m,$$

$$\frac{\partial L_k(i_k, \theta_m)}{\partial \theta_m} = -\frac{z_2(L_{\max}(i_k) - L_{\min})}{2} \sin z_2 \theta_m,$$
(9)

где z_2 — число полюсов ротора.

В уравнениях (9) зависимость максимальной индуктивности обмотки электромагнитного модуля от тока при согласованном положении полюса статора и ротора $L_{\max}(i_k)$ можно представить в табличной форме (см. таблицу).

Ток обмотки, А	2	4	6	8	10	12	14
Индуктивность, мГн	30,2	30,2	30,2	30,2	30	28,2	25

При этом минимальная индуктивность модуля при рассогласованном положении полюса статора и ротора практически не зависит от тока и равна 9,9 мГн.

Модель электромагнитной части двигателя, построенная по уравнениям (5), (7), представлена на рис. 6, а. Зависимости параметров машины $L_k(i_k, \theta_m)$, $\frac{\partial L_k(i_k, \theta_m)}{\partial \theta_m}$ от ее переменных состояния рассчиты-

ваются по уравнениям (9). Модель, реализующая эти зависимости в блоке *Subsystem* (рис. 6, а), приведена на рис. 6, б. В блоке *Lookup Table* модели задается индуктивность $L_{\max}(i_k)$ по табличным данным. В блоках *F1* и *F2* реализуются уравнения (9).

Структурная модель электропривода с МСРМ показана на рис. 7. Датчик положения ротора реализован в блоке *Position_Sensor*, содержание которого представлено на рис. 8. В цифровых интеграторах (блоки *Discrete-Time Integrator*) формируются три пилообразных сигнала углового положения ротора, сдвинутые на 10°. Длительность этих сигналов формируется блоками *Math Function* и составляет 15°. Далее сигналы поступают на блоки *Relational Operator*, где сравниваются с сигналами, задающими включение соответствующей фазы *Turn-on angle* и ее выключение *Turn-off angle*.

На выходе блока *Position_Sensor* генерируются единичные (*sig*, *sig1*, *sig2*) и пилообразные (*Teta_a*,

Teta_b, *Teta_c*) импульсы длительностью 15°, смещенные на 10°, полный цикл повторения составляет 30°. Единичные сигналы (*sig*, *sig1*, *sig2*) обеспечивают формирование токов в соответствующих фазах двигателя. Пилообразные сигналы (*Teta_a*,

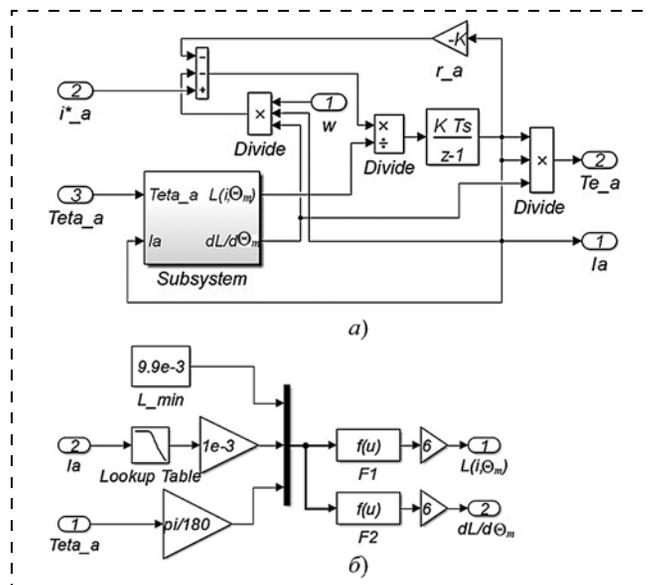


Рис. 6. Модель фазы МСРМ

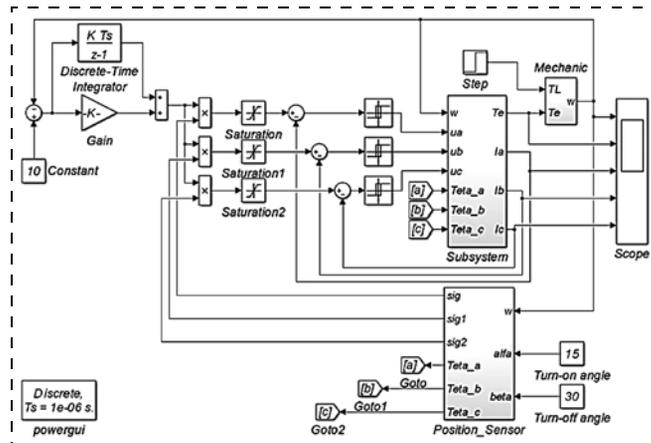


Рис. 7. Структурная модель электропривода с МСРМ

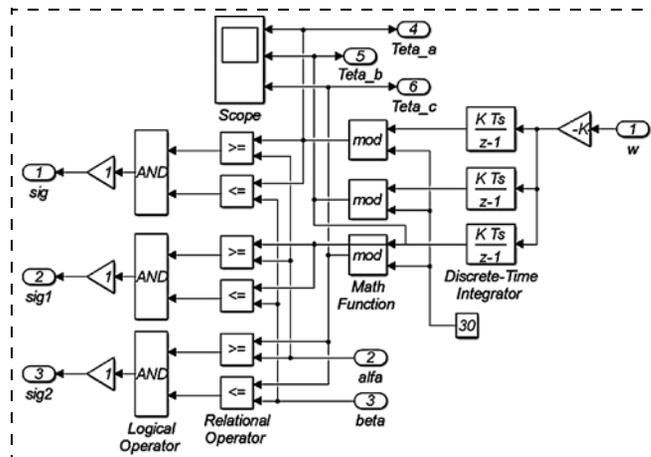


Рис. 8. Модель датчика положения ротора

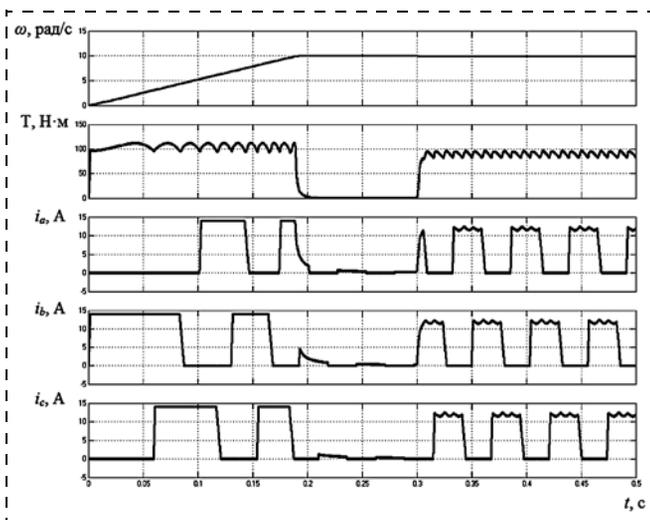


Рис. 9. Переходной процесс в электроприводе с МСРМ

$Teta_b, Teta_c$ обеспечивают вычисление $L_k(i_k, \theta_m)$ и $\frac{\partial L_k(i_k, \theta_m)}{\partial \theta_m}$ для каждой фазы по уравнениям (9).

В блоке *Subsystem* "собраны" три модели фаз МСРМ (см. рис. 6). Суммарный электромагнитный момент трех фаз поступает на блок *Mechanic* (см. рис. 7), в котором реализуется уравнение (2).

Электропривод с модульной синхронной реактивной машиной построен по подчиненному принципу — внешним контуром является скоростной контур, внутренним — токовый. В каждой фазе МСРМ в токовых контурах реализован скользящий режим ("токовый коридор") за счет релейных регуляторов. Ограничение тока в фазах осуществляется блоками *Saturation*. Регулятор скорости представляет собой цифровой ПИ регулятор.

Переходные процессы по скорости, электромагнитному моменту и токам в фазах при пуске и "набросе" момента нагрузки в электроприводе с МСРМ показаны на рис. 9.

Заключение

В двухконтурном электроприводе переходные процессы по моменту и скорости носят аperiodический характер. Пульсации момента в установившемся режиме не превышают 10 %. Электромагнитные и электромеханические характеристики, полученные при моделировании, полностью совпадают с характеристиками, рассчитанными полевыми методами [18, 20] и полученными экспериментально (см. раздел 1). Проектирование МСРМ для электропривода конкретного транспортного средства сводится к выбору числа отдельных электромагнитных модулей и их размещению в объеме машины.

Список литературы

1. Чиликин М. Г., Ивоботенко И. А., Рубцов В. П. и др. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / Под общ. ред. М. Г. Чиликина. М.: Энергия, 1971. 624 с.

2. Овчинников И. Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность). Курс лекций. СПб.: КОРОНА — Век, 2006. 336 с.
3. Шмитц Н., Новотный Д. Введение в электромеханику: Пер. с англ. М.: Энергия, 1969. 336 с.
4. Козаченко В. Ф., Обухов Н. А., Ануцин А. С. и др. Модульная микроконтроллерная система управления для отечественной серии преобразователей частоты "Универсал" // Тр. V Междунар. конф. "Электромеханика, электротехнология и электроматериаловедение" МКЭЭЭ-2003. Ч. 1. Украина, Крым, 2003. С. 725—726.
5. Козаченко В. Ф., Остриров В. Н., Русаков А. М. Перспективные типы тяговых электроприводов // VII Междунар. конф. по автоматизированному электроприводе АЭП—2012. Россия, Иваново, 2012. С. 16—21.
6. Радимов И. Н., Рымша В. В. Сопоставительный анализ вентильных двигателей для электропривода мотор-колес легких транспортных средств // Электромашинобуд. та электрообладн. 2005. Вип. 64. С. 33—36.
7. Bahram A. Variable Reluctance Machines: Analysis Design and Control. Paris: Jouve, 2003. 207 p.
8. Bienkowski K., Szczyplior J., Bucki B., Biernat A., Rogalski A. Influence of geometrical parameters of Switched Reluctance Motor on electromagnetic torque // Proc. 16th Int. Conf. of Electrical Machines. Poland, Krakow, 2004. P. 5—8.
9. Deshpande U. S. Recent Advances in Materials for Use in Permanent Magnet Machines Review // Proc. of IEEE Electrical Machines and Drives Conf. (IEMDC'03). USA, Madison, 2003. Vol. 1. P. 509—515.
10. Huang S., Aydin M., Lipo T. A. TORUS Concept Machines: Pre-Prototyping Design Assessment for Two Major Topologies // Proc. of IEEE Industry Applications Conf. USA, IL, Chicago, 2001. Vol. 3. P. 1619—1625.
11. Hull J. R., Turner L. R. Magnetomechanics of Internal-Dipole Halbach-Array Motor/Generators // IEEE Trans Mag. 2000. Vol. 36. P. 2004—2011.
12. Krishnan R. Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications. Florida: CRC Press LLC, 2001. 416 p.
13. Qu R., Aydin M., Lipo T. A. Performance Comparison of Dual-Rotor Radial-Flux and Axial-Flux Permanent-Magnet BLDC Machines // Proc. of IEEE International Electric machines and Drives Conf. (IEMDC'03). USA, Madison, 2003. V. 3. P. 1948—1954.
14. Wichert T., Kub H. Influence of power electronics on design of Switched Reluctance Machines // Proc. of the EPE 2005. Germany, Dresden, 2005. P. 10.
15. Hrynkiewicz J., Afonin A., German-Galkin S., Kramarz W., Szymczak P., Cierzniwski P. Modular reluctance electric machine // International patent № 2001003270. 2001.
16. Герман-Галкин С. Г., Загашвили Ю. В., Верюжский В. В. Модульная электрическая машина // Патент РФ на полезную модель № 105540. 2010. Бюл. № 16.
17. Бормотов А. В., Герман-Галкин С. Г., Загашвили Ю. В., Лебедев В. В. Модульная электрическая машина // Патент РФ № 2510121. 2014. Бюл. № 28.
18. Герман-Галкин С. Г., Бормотов А. В. Модульная вентильная машина с коммутацией магнитного потока // Силовая электроника. 2012. № 4. С. 46—50.
19. German-Galkin S., Bormotov A. Analytical and model study of a modular electric machine in the electric drive // American Journal of Scientific and Educational Research. 2014. N (4). P. 614—623.
20. User's guide — Maxwell 3D // Ansys Inc. USA, 2012. Rev. 6.
21. Рымша В. В., Радимов И. Н., Баранцев М. В. Технология расчета трехмерного стационарного магнитного поля в вентильно-реактивных электродвигателях на платформе Ansys Workbench // Электротехника і Електромеханіка. 2006. № 6. С. 25—32.
22. Голландцев Ю. А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели. СПб.: ГНЦ РФ — ЦНИИ "Электроприбор", 2003. 148 с.
23. Любарский Б. Г., Рябов Е. С., Оверьянова Л. В., Емельянов В. Л. Имитационная модель тягового вентильно-индукторного электропривода // Электротехніка і Електромеханіка. 2009. № 5. С. 67—72.
24. Козаченко В. Ф., Корпусов Д. В., Остриров В. Н. Электропривод на базе вентильных индукторных машин с электромагнитным возбуждением // Электронные компоненты. 2005. № 6. С. 60—64.
25. Afonin A., Kramarz W., Cierzniwski P. Elektromechaniczne przetworniki energii z komutacją elektroniczną. Szczecin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, 2000. 242 p.

Analytical and Model Study of a Modular Switched Reluctance Machine in the Electrical Drive

S. G. German-Galkin, ggsg@yandex.ru✉, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics ("ITMO"), St. Petersburg, 197101, Russian Federation, Maritime University of Szczecin, Szczecin, 70-205, Poland,

A. V. Bormotov, art_b02@mail.ru, Saint Petersburg Baltic State Technical University named after D. F. Ustinov ("VOENMEH"), St. Petersburg, 190005, Russian Federation

Corresponding author: **German-Galkin Sergei G.**, Professor, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics ("ITMO"), St. Petersburg, 197101, Russian Federation, Maritime University of Szczecin, Szczecin, 70—205, Poland, e-mail: ggsg@yandex.ru

Received on May 13, 2015

Accepted May 29, 2015

The paper presents the results of research and model tests a modular switched reluctance machine (MSRM) and shows the construction implemented in a prototype and tested in static mode, with a detailed explanation of the construction of an electromagnetic modules. It emphasized a number of positive aspects of the practical implementation of this construction, in particular the principle of increasing the overall capacity and distinctive features of its mathematical description. An algorithm for calculating the parameters of the electromagnetic module of the machine in the FEA software package Ansys Maxwell is shown too. On the basis of the calculation results presented in the analytical and graphical form, developed a mathematical description MSRM and created a computer model of the MSRM and a computer model of an electric drive on its basis in the software package MATLAB-Simulink, which confirmed the limit characteristics of the machine specified in the design. Electric drive with the considered machine built by principle of subordination control with the internal current loop, which use the relay s in each phase, i.e. sliding mode, and the outer loop speed, which use the PI regulator.

Keywords: modular construction, switched reluctance machine, mathematical model, computer model, software package MATLAB-Simulink, software package Ansys Maxwell, electric drive

For citation:

German-Galkin S. G., Bormotov A. V. Analytical and Model Study of a Modular Synchronous Switched Reluctance Machine in the Electrical Drive, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 5, pp. 625—631.

DOI: 10.17587/mau.16.625-631

References

1. **Chilikin M. G., Ivobotenko I. A., Rubtsov V. P., Sadovskij L. A., Cacenkin V. K.** *Diskretnyi elektroprivod s shagovymi dvigatelyami* (Step electric drive with stepping motors), Moscow, Energiya, 1971, 624 p. (in Russian).
2. **Ovchinnikov I. Ye.** *Ventil'nye elektricheskie dvigateli i privod na ikh osnove (malaya i srednyaya moshchnost'): kurs lektsii* (Synchronous motors and the drive based on them: a course of lectures), St. Petersburg, KORONA-Vek, 2006, 336 p. (in Russian).
3. **Shmitz N. L., Novotny D. V.** *Vvedenie v elektromekhaniku: per. s angl.* (Introduction into electromechanics: Translated from English), Moscow, Energiya, 1969, 336 p. (in Russian).
4. **Kozachenko V. F., Obukhov N. A., Anuchin A. S., Zharkov A. A.** *Modul'naya mikrokontrollernaya sistema upravleniya dlya otechestvennoi serii preobrazovatelei chastoty "Universal"* (Modular control system for microcontroller series of domestic frequency converters "Universal"), *Trudy V-i Mezhdunar. konf. "Elektromekhanika, elektrotekhnologiya i elektromaterialovedenie" MKEEE-2003 "Modul'naya mikrokontrollernaya sistema upravleniya dlya otechestvennoi serii preobrazovatelei chastoty "Universal"* (Proc. 5th Int. Conf. "Electromechanics, electrical technologies and electrical material science" ICEEE-2003 "Modular microcontroller system of control for indigenous frequency converters "Universal"), Crimea, Ukraine, 2003, vol. 1, pp. 725—726 (in Russian).
5. **Kozachenko V. F., Ostrirov V. N., Rusakov A. M.** *Perspektivnye tipy tyagovykh elektroprivodov* (Perspective types of traction electric drives), *VII Mezhdunar. konf. po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2012 "Perspektivnye tipy tyagovykh elektroprivodov"* (Proc. 7th Int. Conf. on automatic electric drives "Advanced types of traction electric drive"), Ivanovo, Russia, 2012, pp. 16—21 (in Russian).
6. **Radimov I. N., Rymsha V. V.** *Sopostavitel'nyi analiz ventil'nykh dvigatelei dlya elektroprivoda motor-koles legkikh transportnykh sredstv* (Benchmarking study of synchronous motors for the electrical wheel-motor drive of light transportation vehicles), *Electrical Machine-Building and Electrical Equipment*, 2005, Issue 64, pp. 33—36 (in Russian).
7. **Bahram A.** *Variable Reluctance Machines: Analysis Design and Control*, Jouve, Paris, 2003, 207 p.
8. **Bienkowski K., Szczybior J., Bucki B., Biernat A., Rogalski A.** Influence of geometrical parameters of Switched Reluctance Motor on electromagnetic torque, *Proc. 16th Int. Conf. of Electrical Machines "Influence of geometrical parameters of Switched Reluctance Motor on electromagnetic torque"*, Krakow, Poland, 2004, pp. 5—8.
9. **Deshpande U. S.** Recent Advances in Materials for Use in Permanent Magnet Machines Review, *Proc. of IEEE Electrical Machines and Drives Conf (IEMDC'03)* "Recent Advances in Materials for Use in Permanent Magnet Machines Review", Madison, USA, 2003, vol. 1, pp. 509—515.
10. **Huang S., Aydin M., Lipo T. A.** TORUS Concept Machines: Pre-Prototyping Design Assessment for Two Major Topologies, *Proc. of IEEE Industry Applications Conf. "TORUS Concept Machines: Pre-Prototyping Design Assessment for Two Major Topologies"* Chicago, IL., USA, 2001, vol. 3, pp. 1619—1625.
11. **Hull J. R., Turner L. R.** Magnetomechanics of Internal-Dipole Halbach-Array Motor/Generators, *IEEE Trans Mag. "Magnetomechanics of Internal-Dipole Halbach-Array Motor/Generators"*, 2000, vol. 36, pp. 2004—2011.
12. **Krishnan R.** *Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications*, CRC Press LLC, Florida, 2001, 416 p.
13. **Qu R., Aydin M., Lipo T. A.** Performance Comparison of Dual-Rotor Radial-Flux and Axial-Flux Permanent-Magnet BLDC Machines, *Proc. of IEEE International Electric machines and Drives Conf (IEMDC'03)* "Performance Comparison of Dual-Rotor Radial-Flux and Axial-Flux Permanent-Magnet BLDC Machines", Madison, USA, 2003, vol. 3, pp. 1948—1954.
14. **Wichert T., Kub H.** Influence of power electronics on design of Switched Reluctance Machines, *Proc. of the EPE 2005 "Influence of power electronics on design of Switched Reluctance Machines"*, Dresden, Germany, 2005, pp. 10.
15. **Hryniewicz J., Afonin A., German-Galkin S., Kramarz W., Szymczak P., Cierzniwski P.** *Modular reluctance electric machine. Patent WO 2001003270 A1*. 11.01.2001.
16. **German-Galkin S. G., Zagashvili Yu. V., Veryuzhskii V. V.** *Modul'naya elektricheskaya mashina (Modular electrical machine). Useful model patent RU 105540 U1*. 10.06.2010. (in Russian).

17. Bormotov A. V., German-Galkin S. G., Zagashvili Yu. V., Lebedev V. V. *Modul'naya elektricheskaya mashina* (Modular electrical machine). Patent RU 2510121 C2. 20.03.2014 (in Russian).

18. German-Galkin S. G., Bormotov A. V. *Modul'naya ventil'naya mashina s kommutatsiei magnitnogo potoka* (Modular machine with a magnetic flux switching), *Power Electronics*, 2012, no. 4, pp. 46–50 (in Russian).

19. German-Galkin S., Bormotov A. Analytical and model study of a modular electric machine in the electric drive, *American Journal of Scientific and Educational Research*, 2014, no. 1 (4), pp. 614–623.

20. *User's guide* — Maxwell 3D, Ansys Inc., USA, 2012, Rev. 6.

21. Rymsha V. V., Radimov I. N., Barantsev M. V. *Tekhnologiya rascheta trekhmernogo statsionarnogo magnitnogo polya v ventil'no-reaktivnykh elektrodvigatelyakh na platforme Ansys Workbench* (Ansys Workbench powered calculation technique of stationary 3D magnetic field in switched-reluctance motors), *Elektrotehnika i Elektromekhanika*, 2006, no. 6, pp. 25–32 (in Russian).

22. Gollandtsev Yu. A. *Ventil'nye induktorno-reaktivnye dvigateli* (Synchronous inductor-reluctance motors), St. Petersburg, SSC of RF CSRI "Elektropribor", 2003, 148 p. (in Russian).

23. Lubarskii B. G., Ryabov Ye. S., Overyanova L. V., Emel'yanov V. L. *Imitatsionnaya model' tyagovogo ventil'no-induktornogo elektropriroda* (Simulation model of a synchronous inductor traction motor), *Elektrotehnika i Elektromekhanika*, 2009, no. 5, pp. 67–72 (in Russian).

24. Kozachenko V. F., Korpusev D. V., Ostrirov V. N. *Elektroprirod na baze ventil'nykh induktornykh mashin s elektromagnitnym vzbuzhdeniem* (Electrical drive based on synchronous inductor machines with electromagnetic excitation), *Electronic Components*, 2005, no. 6, pp. 60–64 (in Russian).

25. Afonin A., Kramarz W., Cierzniewski P. *Elektromechaniczne przetworniki energii z komutacją elektroniczną*, Szczecin, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, 2000, 242 p. (in Polish).

УДК 681.515.8

DOI: 10.17587/mau.16.631-636

Н. С. Земцов, аспирант, nikita.zemtsov@tul.cz,
Либерецкий технический университет, г. Либерец, Чешская Республика,
Г. А. Французова, д-р техн. наук, проф., frants@ac.cs.nstu.ru,
Новосибирский государственный технический университет

Синтез ПИД регулятора для системы управления прямоточным котлом¹

Обсуждается задача синтеза системы управления для прямоточного котла. Рассматривается упрощенная модель одного из нагревателей, для которого с учетом возможности измерения промежуточной переменной предлагается формировать каскадное управление. Показано, что во внутреннем контуре достаточно применения типового П регулятора. Параметры внешнего контура нагревателя нестационарны и существенно зависят от нагрузки на котел, поэтому предлагается использовать ПИД регулятор, коэффициенты которого рассчитываются на основе метода локализации. Представлены результаты моделирования, подтверждающие работоспособность системы управления нагревателем для основных режимов функционирования.

Ключевые слова: прямоточный котел, нагреватель, каскадное управление, нестационарный объект, ПИД регулятор, метод локализации

Введение

Паровые котлы широко применяются в теплоэнергетике и промышленности. Их основным назначением является генерация насыщенного или перегретого пара высокого давления, который приводит в движение турбину. Существуют два типа паровых котлов: газотрубные и водотрубные котлы. Последние, в свою очередь, делятся на барабанные и прямоточные [1]. Главным отличием принципа действия прямоточного котла является то, что вода проходит через испарительные трубы однократно, постепенно превращаясь в пар. В случае барабанного котла кратность циркуляции воды может достигать 30 раз, что приводит к более длительному времени приведения такого типа котлов в рабочее состояние и замедляет время нагрева пара. В работе

рассматривается система стабилизации температуры в прямоточном котле, параметры которого изменяются в ходе технологического процесса в зависимости от нагрузки. Такие котлы широко используются в качестве резервных установок, применяющихся при пиковых сбоях или при сбоях основных котельных агрегатов. Прямоточные паровые котлы малой мощности благодаря своей компактности и относительно невысокой стоимости находят широкое применение в сфере коммунального хозяйства, небольших производствах, сельском хозяйстве [2].

1. Принцип действия прямоточного котла

В работе рассматривается прямоточный котел (рис. 1), который состоит из последовательно соединенных нагревателей [3]. Здесь НР — контур высокого давления; ЛР — контур низкого давления; V1–V3 — клапаны, позволяющие контролировать температуру пара на входе соответствующего нагревателя; T11 — датчик температуры пара, поступающего на лопатки турбины.

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному заданию № 2014/138, тема проекта "Новые структуры, модели и алгоритмы для прорывных методов управления техническими системами на основе наукоемких результатов интеллектуальной деятельности".

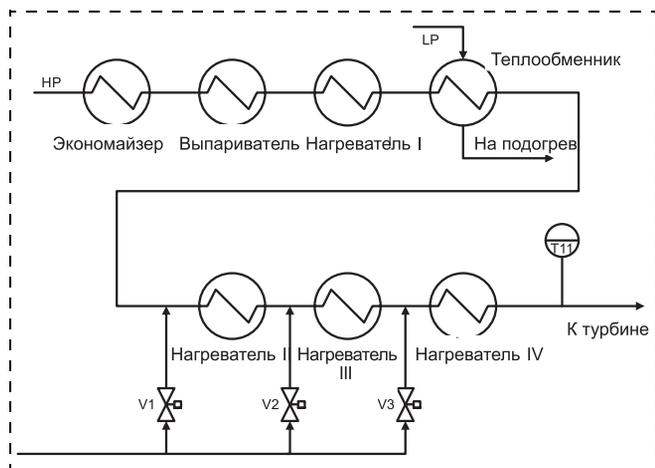


Рис. 1. Упрощенная схема прямооточного котла

Экономайзер служит для подогрева питательной воды перед подачей в котел с помощью уходящих из котла газов. Нагретая до 200 °С питательная вода поступает на вход "Выпаривателя", где превращается в пар.

Полученный пар последовательно проходит четыре нагревателя (Нагреватель I — Нагреватель IV), где он постепенно нагревается до температуры 460...575 °С (значение температуры зависит от нагрузки), после чего подается на рабочие лопатки высокого давления и приводит в движение турбину.

Пар низкого давления после турбины поступает на "Рекуперативный теплообменник", подогревается и подается на рабочие лопатки турбины низкого давления [4]. Такая организация позволяет обеспечить более высокий КПД.

Если рассматривать систему в целом, то технологический процесс является достаточно сложным, строго говоря, нелинейным и включает множество параметров, которые зависят от нагрузки на котел (Q) и качества пара.

Возможная нагрузка в диапазоне 50...100 % соответствует 125...250 МВт мощности.

В данной работе основное внимание уделяется контролю температуры в котле, причем наиболее важной является температура пара на выходе последнего нагревателя, который приводит в движение турбину.

В системе предусмотрены клапаны V1 — V3 для подачи холодной воды под высоким давлением, что позволяет контролировать процесс нагрева пара в соответствующих нагревателях. Вода поступает напрямую в трубы с паром через специальные распылители, тем самым понижая температуру пара.

2. Упрощенная математическая модель нагревателя

Поскольку нагреватели II—IV идентичны, то достаточно рассмотреть один из них, схема системы управления которым представлена на рис. 2.

Рабочей средой здесь является нагреваемый пар, а холодная вода позволяет регулировать темпера-

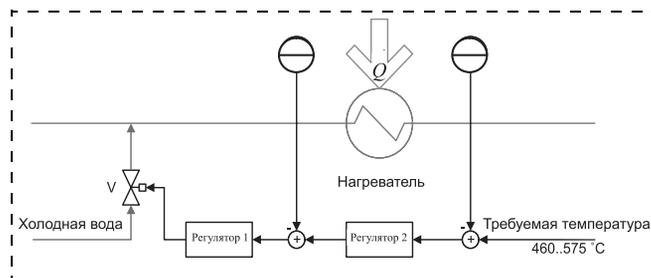


Рис. 2. Схема системы управления нагревателем

туру входного пара нагревателя посредством клапана V. Двойная стрелка Q показывает зависимость параметров нагревателя от текущей нагрузки. Наличие датчиков температуры входного и выходного пара (t_{in} , t_{out}) позволяет организовать каскадное управление в системе.

Во внутреннем контуре с помощью регулятора (Регулятор 1) контролируется значение температуры пара на входе нагревателя t_{in} , а во внешнем контуре второй регулятор (Регулятор 2) обеспечивает стабилизацию значения температуры на выходе нагревателя t_{out} . При этом управляющим воздействием, генерируемым регулятором, является положение клапана.

В техническом университете города Либерец (Чешская Республика) была разработана линеаризованная модель рассматриваемого прямооточного котла [5], которая достаточно точно отражает его динамические свойства. Она имеет вид последовательного соединения звеньев со следующими передаточными функциями:

$$G_1(p) = \frac{K_{t_{in}}}{(T_{in1}p + 1)(T_{in2}p + 1)(T_{in3}p + 1)}, \quad (1)$$

$$G_2(p) = \frac{K_{t_{out}}}{(T_{out}p + 1)^n}, \quad (2)$$

параметры которых и порядок передаточной функции $G_2(p)$ в зависимости от уровня нагрузки представлены в табл. 1.

Структура каскадной системы управления нагревателем показана на рис. 3.

Здесь $G_{C1}(p)$ и $G_{C2}(p)$ — передаточные функции регуляторов внутреннего и внешнего контуров соответственно. Передаточная функция $G_1(p)$ опре-

Таблица 1

Нагрузка Q , %	G_1				G_2		
	$K_{t_{in}}$	T_{in1}	T_{in2}	T_{in3}	$K_{t_{out}}$	T_{out}	n
0...50	-118,74	1,69	1,82	3,8	1,0675	43	4
50...70	-73,6931	1,69	1,82	3,8	1,1313	39	3
70...90	-48,9919	1,69	1,82	3,8	1,1723	28	3
90...100	-40,6271	1,69	1,82	3,8	1,1948	25	3

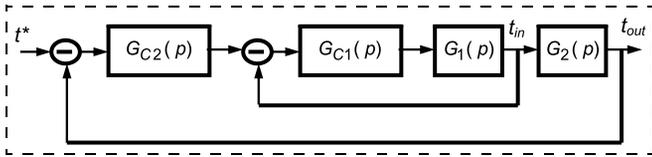


Рис. 3. Структурная схема системы управления

деляет взаимосвязь между положением клапана и температурой на входе нагревателя. Как видно из табл. 1, коэффициент $K_{t_{in}}$ отрицательный, и это означает, что открытие клапана приводит к уменьшению температуры пара. Постоянные времени (T_{in1} , T_{in2} и T_{in3}) не зависят от уровня нагрузки и определяются самим клапаном. Однако уровень нагрузки влияет на коэффициент усиления передаточной функции. Это объясняется тем, что при увеличении нагрузки увеличивается давление пара, что уменьшает эффективность процесса охлаждения.

Передаточная функция $G_2(p)$ определяет взаимосвязь между температурой на входе и температурой на выходе нагревателя. Увеличение нагрузки приводит к ускорению процесса нагрева пара — постоянная времени T_{out} уменьшается, а коэффициент $K_{t_{out}}$ увеличивается, что говорит об увеличении эффективности нагрева пара.

Следует отметить, что при увеличении давления пара (при увеличении нагрузки) проявляются нелинейные свойства клапана, а именно, положение клапана V смещается на соответствующее значение v_0 (табл. 2).

Таблица 2

Смещение клапана	$Q, \%$					
	0...50	50...60	60...70	70...80	80...90	90...100
v_0	0,005952	0,05849	0,0966	0,1179	0,1109	0,0732

Однако представленную математическую модель нагревателя можно считать линейной, если рассматривать нелинейные свойства клапана как возмущение по управлению.

3. Особенности проточного котла как объекта управления

Нагреватель как объект управления обладает следующим рядом особенностей, которые необходимо учитывать при выборе регулятора:

- параметры и порядок объекта зависят от текущей нагрузки (см. табл. 1);
- управление в системе ограничено;
- на вход и выход нагревателя действуют возмущения.

При работе с ним следует помнить, что управляющее воздействие может изменяться только в диапазоне от 0 до 1 (0...100 %), что соответствует

полностью открытому и полностью закрытому положению клапана. Также следует отметить, что единственная возможность воздействия на систему — это охлаждение пара. Если температура пара слишком мала, то единственное возможное действие с точки зрения регулирования температуры — закрыть клапан до тех пор, пока температура пара не войдет в рабочую зону.

В системе имеется два типа возмущений, причем работа со вторым типом (приложенным к выходу системы) является наиболее трудной, так как возмущение "проходит" напрямую в регулятор. Следовательно, при синтезе регулятора нужно учитывать необходимость обработки такого возмущения.

Отметим также, что "наихудшим" случаем является система с параметрами, соответствующими нагрузке 50 % от максимальной. Этому состоянию соответствуют наибольший порядок системы, наибольшие постоянные времени и наибольший коэффициент усиления, что по отдельности и в целом затрудняет синтез регулятора.

4. Требования к системе управления

В настоящее время система контроля температуры пара уже разработана и используется в реальной установке [6]. Имеющаяся система представляет собой каскад адаптивных ПИ регуляторов, параметры которых были подобраны эмпирическим путем. Очевидно, что такой подход к синтезу системы управления не является оптимальным, что говорит об актуальности разработки робастного регулятора, который должен обеспечивать заданное качество работы системы.

Основные требования, предъявляемые к системе управления, следующие:

- постоянная структура и параметры регулятора;
- время обработки входного воздействия в рабочей зоне температур должно соответствовать технологическому процессу;
- парирование изменения параметров объекта при изменении текущей нагрузки;
- обработка возмущения по температуре выходного пара;
- управляющее воздействие должно находиться в диапазоне от 0 до 1;
- управляющее воздействие не должно содержать высокочастотных колебаний.

На основе указанных требований выделим три основных режима работы системы для проверки работоспособности регулятора:

- постоянный уровень нагрузки, ступенчатое входное воздействие;
- постоянный уровень нагрузки, отсутствие входного воздействия, обработка возмущения, приложенного к выходу системы;
- переменный уровень нагрузки (изменяется по линейному закону), ступенчатое входное воздействие.

5. Стабилизация внутреннего контура

Исследуемая модель проточного котла включает в себя два контура (рис. 3), процессы в которых являются разнотемповыми, так как постоянные времени внутреннего и внешнего контуров различаются более чем на один порядок. В этом случае можно синтезировать регуляторы для внутреннего $G_{C1}(p)$ и внешнего контуров $G_{C2}(p)$ независимо друг от друга.

Проведенные ранее исследования в области синтеза регулятора для рассматриваемого проточного котла показывают, что для стабилизации внутреннего контура целесообразно использовать пропорциональный регулятор [6], коэффициент которого был выбран опытным путем (рис. 4).

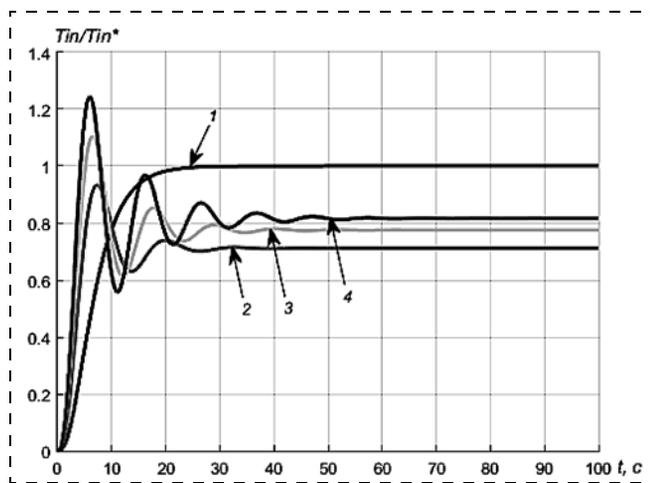


Рис. 4. Выбор коэффициента П регулятора:
1 — переходный процесс без регулятора; 2 — переходный процесс регулятора с коэффициентом, равным 0,05; 3 — переходный процесс регулятора с коэффициентом 0,07; 4 — переходный процесс регулятора с коэффициентом 0,09

Как видно, приемлемые динамические свойства в контуре обеспечивает коэффициент П регулятора, равный 0,07. Имеющаяся статическая ошибка будет скомпенсирована регулятором внешнего контура.

6. Расчет параметров ПИД регулятора внешнего контура

При расчете внешнего контура внутренний можно не учитывать, поскольку процессы в нем уже закончились. В качестве регулятора внешнего контура предлагается использовать типовой ПИД регулятор

$$G_{C2}(p) = K_{\Pi} + \frac{K_{\text{И}}}{p} + \frac{K_{\text{Д}}p}{\tau p + 1}, \quad (3)$$

где τ — постоянная времени реального дифференцирующего устройства. В результате преобразований (3) принимает вид

$$G_{C2}(p) = \frac{(K_{\text{Д}} + \tau K_{\Pi})p^2 + (K_{\Pi} + \tau K_{\text{И}})p + K_{\text{И}}}{p(\tau p + 1)}. \quad (4)$$

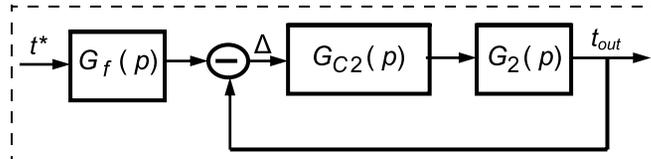


Рис. 5. Структурная схема внешнего контура

Как видно, регулятор $G_{C2}(p)$ содержит форсирующий полином и для $G_2(p)$ второго порядка по форме соответствует регулятору, основанному на методе локализации [7, 8]. В связи с этим предлагается рассчитывать параметры ПИД регулятора (3) на базе данного метода, аналогично работам [9, 10]. Предварительно выражение (4) записывается в форме

$$G_{C2}(p) = K \frac{p^2 + 2cp + c^2}{p(\tau p + 1)},$$

где c — параметр, который определяет длительность процесса, K — точность. Их численные значения следующие: $K = 35$, $c = 0,017$, $\tau = 20$.

Преобразованная расчетная схема системы представлена на рис. 5. Здесь Δ — ошибка регулирования; $G_f(p)$ — предварительный фильтр, который позволяет улучшить качество переходного процесса:

$$G_f(p) = \frac{c}{p^2 + 2cp + c^2}.$$

В соответствии с алгоритмом расчета робастного ПИД регулятора [9, 10] его параметры определяются по соотношениям

$$K_{\Pi} = Kc(2 - \tau c), \quad K_{\text{И}} = Kc^2, \quad K_{\text{Д}} = K - \tau K_{\Pi}$$

и имеют численные значения: $K_{\Pi} = 0,988$; $K_{\text{И}} = 0,0101$; $K_{\text{Д}} = 0,0656$.

7. Проверка работоспособности ПИД регулятора

Работоспособность полученной системы управления проточным котлом проверяли путем моделирования выделенных основных режимов. Представленные графики иллюстрируют результаты отработки ступенчатого входного воздействия (рис. 6) и возмущения, приложенного к выходу системы (рис. 7); здесь v — изменение положения клапана.

Данные результаты (рис. 6, 7) были получены при нагрузке $Q = 50\%$, что является "наихудшим случаем". Для остальных уровней нагрузки наблюдается отсутствие перерегулирования и меньшее время переходных процессов, т. е. выполняются все требования к системе регулирования.

Второй режим работы соответствует изменению уровня нагрузки с течением времени и является не менее важным с технологической точки зрения. Изменение нагрузки моделировалось в виде линейно-возрастающей функции в диапазоне от 50 до 100%. Полученные результаты представлены на рис. 8.

Следует отметить, что в данном режиме работы проточный котел представляет собой нестациона-

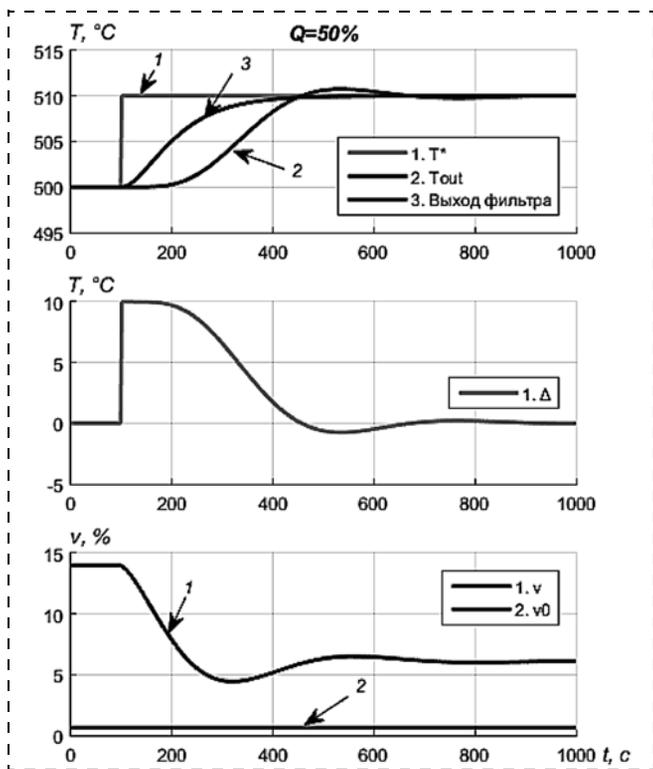


Рис. 6. Обработка ступенчатого входного воздействия

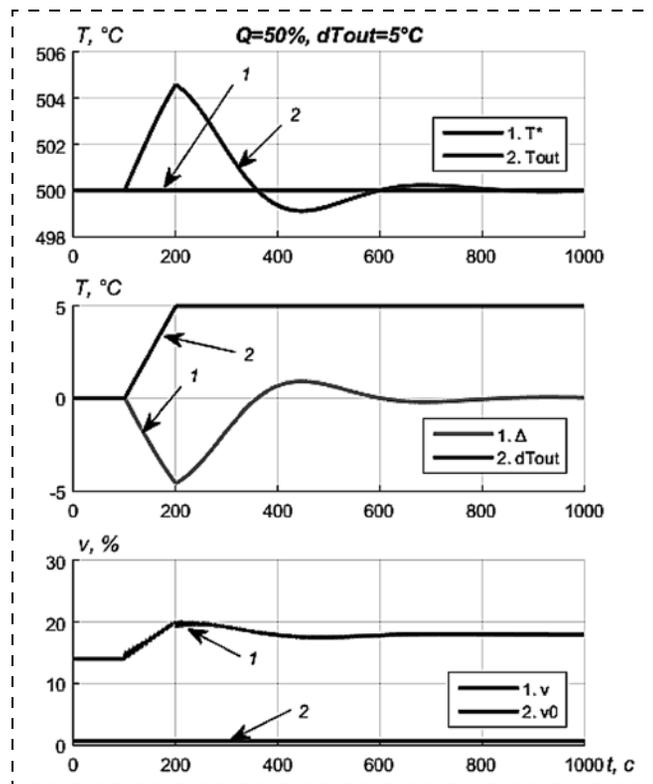


Рис. 7. Обработка возмущения

нарный объект управления, поскольку изменение нагрузки по линейному закону приводит к изменению параметров объекта. Однако и в данной ситуации рассчитанный ПИД регулятор обеспечивает выполнение заданных требований к системе.

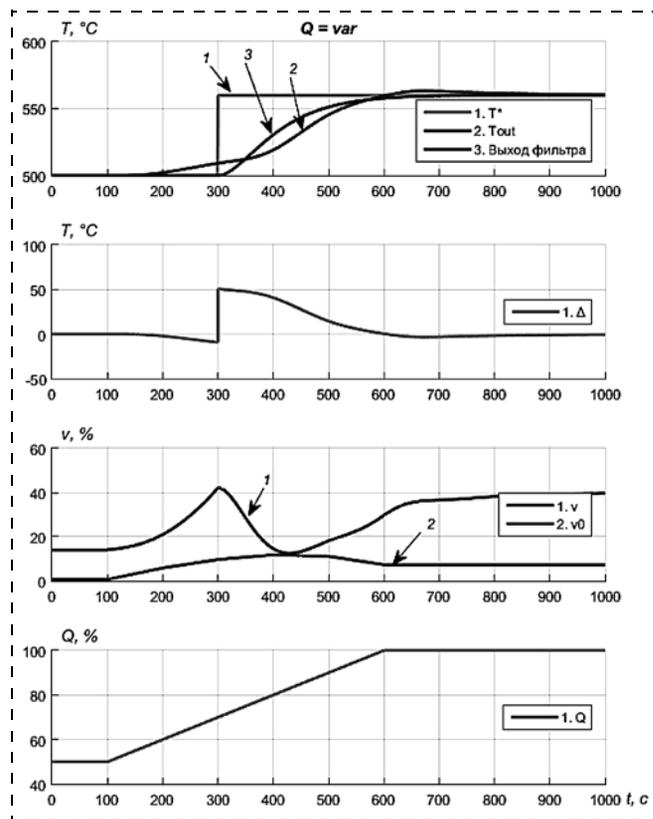


Рис. 8. Влияние переменного уровня нагрузки

Заключение

В работе исследована возможность использования робастного ПИД регулятора в системе управления прямоточным котлом. Главным отличием и преимуществом полученного регулятора по сравнению с разработанным ранее адаптивным регулятором является то, что он имеет постоянные параметры и структуру. Использование старшей производной выходной величины при формировании управляющего воздействия позволяет парировать влияние нелинейных характеристик и нестационарных параметров нагревателя. Описанные качества предложенного регулятора говорят о его эффективности, и, следовательно, данный подход может быть использован для решения относительно широкого круга задач управления.

Список литературы

1. Паровой котел. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Паровой_котел (дата обращения: 20.11.14).
2. Преимущества прямоточных паровых котлов. URL: <http://www.otopimdom.ru/index.php?id=509> (дата обращения: 05.12.14).
3. Nahlovsky T., Modrlak O. The Fuzzy Approach to the Temperature Control of Superheated Steam.
4. Паровая турбина. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Паровая_турбина (дата обращения: 28.03.14).
5. Opalka J., Nahlovsky T. Continuously switched linearized models of the nonlinear once-through boiler model // Proc. of International Conference on Process Control (18–21 June 2013). 2013. P. 263–267. doi: 10.1109/PC.2013.6581420.

6. **Hubka L., Modrlak O.** The practical possibilities of steam temperature dynamic models application // Proc. of 13th International Conference "Carpathian Control Conference (ICCC)" (28–31 May 2012). 2012. P. 237–242. doi: 10.1109/CarpathianCC2012.6228646.

7. **Востриков А. С., Французова Г. А.** Теория автоматического регулирования. М.: Высшая школа, 2006. 365 с.

8. **Востриков А. С., Уткин В. И., Французова Г. А.** Система с производной вектора состояния в управлении // Автоматика и телемеханика. 1982. № 3. С. 22–25.

9. **Французова Г. А., Земцов Н. С.** Применение метода локализации для расчета робастного ПИД-регулятора // Научный вестник НГТУ. 2013. № 3 (52). С. 18–21.

10. **Zemtsov N. S., Frantsuzova G. A., Hubka L., Modrlak O.** Calculation of robust PID-controller // Proc. of 12th Intern. Conf. "Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2014)" (2–4 October 2014). Novosibirsk. 2014. Vol. 1. P. 675–678.

11. **Hubka L.** Temperature dynamics of heat exchangers in boiler // Proc. of 7th Eurosim Congress on Modeling and Simulation. Praha. 2010.

Design of PID-Controller for a Once-Through Boiler

N. S. Zemtsov, nikita.zemtsov@tul.cz, Technical University of Liberec, Faculty of Mechatronics, Informatics and Interdisciplinary Studies, Liberec, 46117, Czech Republic,
G. A. Frantsuzova, frants@ac.cs.nstu.ru✉,
 Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Corresponding author: **Frantsuzova Galina A.**, Professor, Novosibirsk State Technical University, Automatics Department, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, e-mail: frants@ac.cs.nstu.ru

Received on March 23, 2015

Accepted on April 17, 2015

The problem of synthesis of control system for once-through boiler is discussed in the paper. The simplified linear model of the boiler heater is considered here. It is proposed to use cascade control approach to control the plant as it is possible to measure the intermediate variable. Different dynamics of the inner and outer circuits simplifies the designing process. It is shown that the inner loop can be controlled by using typical Pcontroller. Parameters of the external heater circuit are non-stationary and depend on the boiler load so it is suggested to use the robust PID controller to control it. The coefficients of this controller are suggested to be calculated on the basis of the localization method. The main advantage of the method is using the derivative vector for manipulated variable calculations, which allows us to deal with the pending type of control object. This paper includes numerical experiments with a set of linearized model of the super-heater. The results show that the obtained control system has good enough quality of transient processes. The designed set of controllers was applied to the great non-linear model of the once-through boiler, which provides more realistic transient processes. The simulation results of this application are almost the same as in case of the linear model. Therefore it can be said that the designed control system fully perform all the requirements.

Keywords: once-through boiler, heater, cascade control, non-stationary object, PID-controller, localization method

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Ministry of Science and Education, State Task № 2014/138, theme "New structures, models and algorithms for the management of the break-through technology systems based on high-tech results of intellectual activity".

For citation:

Zemtsov N. S., Frantsuzova G. A. Design of PID-Controller for a Once-Through Boiler, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 9, pp. 631–636.

DOI: 10.17587/mau.16.631-636

References

1. **Parovoj kotel** (steam boiler), available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/Parovoj_kotel (data of access 20.11.14).

2. **Preimushhestva prjamotochnyh parovyh kotlov** (advantages of the steam boilers), available at: <http://www.otopimdom.ru/index.php?id=509> (data of access: 05.12.14).

3. **Nahlovsky T., Modrlak O.** The Fuzzy Approach to the Temperature Control of Superheated Steam. In 17th International Conference on System Theory, Control and Computing 2013 (ICSTCC 2013) — Joint Conference Proceedings. 11–13 October 2013. Sinaia, Romania, s. 374–379. ISBN 978-1-4799-2228-4.

4. **Parovaja turbine** (steam turbines), available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/Parovaja_turbina (data of access: 28.03.14).

5. **Opalka J., Nahlovsky T.** Continuously switched linearized models of the nonlinear once-through boiler model, *Proc. of International Conference on Process Control (18–21 June 2013)*, 2013, pp. 263–267. doi: 10.1109/PC.2013.6581420.

6. **Hubka L., Modrlak O.** The practical possibilities of steam temperature dynamic models application, *Proc. of 13th International Conference "Carpathian Control Conference (ICCC)"* (28–31 May 2012), 2012, pp. 237–242. doi: 10.1109/CarpathianCC2012.6228646.

7. **Vostrikov A. S., Frantsuzova G. A.** *Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya* (Theory of the automatic control), Moscow, Vischajj chkola, 2006, 365 p. (in Russian).

8. **Vostrikov A. S., Utkin V. I., Frantsuzova G. A.** *Sistema s proizvodnoj vektora sostojaniya v upravlenii* (System with using vector of state derivative for manipulated variable calculations), *Avtomatika i Telemechanika*, 1982, no. 3, pp. 22–25 (in Russian).

9. **Frantsuzova G. A., Zemtsov N. S.** *Primenenie metoda lokalizatsii dlja rascheta robastnogo PID-regulyatora* (Using the localization method for robust PID-controller calculations), *Nauchnyj Vestnik NGTU*, 2013, no. 3 (52), pp. 18–21 (in Russian).

10. **Zemtsov N. S., Frantsuzova G. A., Hubka L., Modrlak O.** Calculation of robust PID-controller, *Proc. of 12th Intern. Conf. "Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2014)"* (2–4 October 2014), Novosibirsk, 2014, vol. 1, pp. 675–678.

11. **Hubka L.** Temperature Dynamic of Heat Exchangers in Boilers, *Eurosim 2010 — 7th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation*, Praha. CTU, Praha, 2010, p. 1–5.

В. В. Алешкин, д-р техн. наук, проф., aleshkinvv@ya.ru,

П. К. Плотников, д-р техн. наук, проф., pribor@sstu.ru,

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., Саратов

Экспериментальное подтверждение снижения погрешностей блока гироскопических измерителей угловой скорости за счет алгоритмической компенсации

Экспериментально подтверждается эффективность асимптотического подхода к решению задачи определения компонентов вектора абсолютной угловой скорости объекта по информации блока трех двухстепенных гироскопов. Применение алгоритмов, построенных на основе уравнений обратной задачи для блока трех гироскопических измерителей угловой скорости, позволяет значительно снизить как постоянные составляющие, так и мгновенные значения погрешностей оценивания угловых скоростей.

Ключевые слова: блок датчиков, методические погрешности, алгоритмическая компенсация, результаты экспериментов

Введение

В работах [1, 2] показано, что в качестве алгоритма оценивания параметров движения объекта могут применяться уравнения обратной задачи для блока трех двухстепенных гироскопов. При выполнении условий существования, единственности и асимптотической устойчивости решений применение этих уравнений для оценки компонентов вектора абсолютной угловой скорости позволяет снизить погрешности блока гироскопических измерителей угловой скорости (ГИУС), учтенные в исходной математической модели блока. Экспериментальную оценку эффективности предложенных

алгоритмов проводили для блока трех ГИУС, ортогонально расположенных в блоке, с применением упрощенных алгоритмов компенсации погрешностей. Ориентация осей гироскопов (X_i, Y_i, Z_i) ($i = 1, 2, 3$) относительно осей блока (X, Y, Z) приведена на рис. 1.

Методика проведения эксперимента

Экспериментальную работу с блоком трех двухстепенных гироскопов проводили в четыре этапа.

На первом этапе определяли масштабные коэффициенты K_M^i и коэффициенты передачи датчиков углов K_β^i каждого из гироскопов блока. При этом

сигналы с датчиков углов U_β^i ($i = 1, 2, 3$) измеряли после демодуляции. Для гироскопов, используемых в эксперименте, получены следующие значения коэффициентов:

$$K_M^1 = 171,42 \text{ МВ} \cdot \text{с}/^\circ, K_\beta^1 = 605 \text{ МВ}/^\circ,$$

$$K_M^2 = 170,7 \text{ МВ} \cdot \text{с}/^\circ, K_\beta^2 = 780 \text{ МВ}/^\circ,$$

$$K_M^3 = 166,29 \text{ МВ} \cdot \text{с}/^\circ, K_\beta^3 = 449 \text{ МВ}/^\circ.$$

На втором этапе исследовали точность компенсации погрешностей перекрестных связей и нелинейностей масштабных коэффициентов ГИУС. В качестве алгоритма работы вычислительного устройства использовали конечные выражения, полученные из

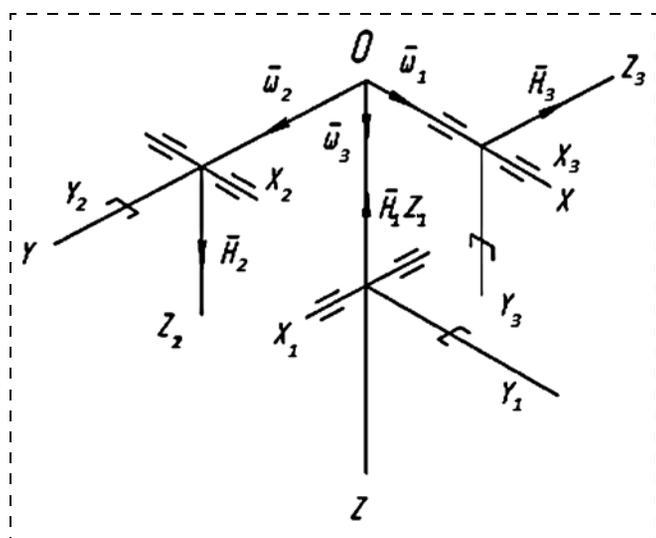


Рис. 1. Ориентация осей ГИУС в блоке

уравнений, учитывающих указанные погрешности. В соответствии с ориентацией осей приборов в блоке эти уравнения имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} -\omega_1 \cos \beta^1 - \omega_3 \sin \beta^1 &= \frac{Q^1}{H^1} = \frac{U_M^1}{K_M^1}; \\ -\omega_2 \cos \beta^2 + \omega_3 \sin \beta^2 &= \frac{Q^2}{H^2} = \frac{U_M^2}{K_M^2}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} -\omega_3 \cos \beta^3 - \omega_2 \sin \beta^3 &= \frac{Q^3}{H^3} = \frac{U_M^3}{K_M^3}; \\ \beta^1 &= \frac{U_\beta^1}{K_\beta^1}; \beta^2 = \frac{U_\beta^2}{K_\beta^2}; \beta^3 = \frac{U_\beta^3}{K_\beta^3}, \end{aligned} \quad (2)$$

где H^i ($i = 1, 2, 3$) — кинетический момент ротора i -го ГИУС; Q^i — момент обратной связи; U_M^i — напряжения, снимаемые с эталонных резисторов, соединенных последовательно с обмотками датчиков моментов; ω_j ($j = 1, 2, 3$) — проекции вектора абсолютной угловой скорости объекта на оси блока; β^i — углы относительных поворотов чувствительных элементов ГИУС.

Решения системы (1) относительно угловых скоростей $\omega_1, \omega_2, \omega_3$, вычисленные значения которых обозначим V_1, V_2, V_3 , полученные по формулам Крамера, имеют вид

$$V_j = \frac{\Delta_j}{\Delta},$$

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= P_2 \sin \beta^1 \sin \beta^3 + \\ &+ P_1 (\cos \beta^2 \cos \beta^3 + \sin \beta^2 \sin \beta^3) + P_3 \cos \beta^2 \sin \beta^1; \\ \Delta_2 &= P_2 \cos \beta^3 \cos \beta^1 + P_3 \sin \beta^2 \cos \beta^1; \\ \Delta_3 &= -P_2 \sin \beta^3 \cos \beta^1 + P_3 \cos \beta^1 \cos \beta^2; \\ \Delta &= -\cos \beta^1 \cos \beta^2 \cos \beta^3 - \cos \beta^1 \sin \beta^2 \sin \beta^3; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \beta^1 &= \frac{U_\beta^1}{K_\beta^1}; \beta^2 = \frac{U_\beta^2}{K_\beta^2}; \beta^3 = \frac{U_\beta^3}{K_\beta^3}; \\ P_1 &= \frac{U_M^1}{K_M^1}; P_2 = \frac{U_M^2}{K_M^2}; P_3 = \frac{U_M^3}{K_M^3}. \end{aligned} \quad (4)$$

Выражения (3), (4) являются алгоритмом вычисления оценок угловых скоростей с компенсацией погрешностей перекрестных связей и нелинейностей масштабных коэффициентов блока ГИУС.

Эксперимент проводился следующим образом. Блок гироскопов с помощью специального кронштейна разворачивался относительно платформы поворотного стола установки проверки гироскопов

(УПГ) на два фиксированных угла вокруг взаимно перпендикулярных осей для создания трех проекций угловой скорости вращения платформы на оси чувствительности приборов. Затем включался двигатель УПГ, и информация ГИУС и дискретного фотоэлектрического датчика угла поворота платформы записывалась в память машины. По окончании записи ЦВМ обрабатывала информацию. При этом с частотой 500 Гц вычислялись значения проекций угловой скорости вращения платформы ω_j ($j = 1, 2, 3$) на оси чувствительности ГИУС. Показания U_M^1, U_M^2, U_M^3 ГИУС с помощью масштабных коэффициентов K_M^1, K_M^2, K_M^3 пересчитывались в угловые скорости $V_j^* = P_j$ ($j = 1, 2, 3$), измеренные ГИУС. Наконец, по алгоритму (3), (4) вычислялись значения угловых скоростей V_j ($j = 1, 2, 3$) с компенсацией методических погрешностей.

Несовершенство привода УПГ приводило к тому, что угловая скорость платформы колебалась около заданного значения и, по существу, являлась реализацией стационарного случайного процесса. Поэтому для анализа экспериментальных данных применяли методы корреляционного анализа случайных процессов [3].

Результаты экспериментов

Номинальные значения компонент угловой скорости задавали следующими:

$$\omega_1 \approx -3,51^\circ/\text{с}; \omega_2 \approx 3,51^\circ/\text{с}; \omega_3 \approx -2,86^\circ/\text{с}.$$

С этими угловыми скоростями было снято 20 реализаций. Для вычисления угловой скорости по показаниям блока ГИУС и алгоритму (3), (4) использовали показания, разделенные интервалом времени 1 с, что примерно в 5 раз превышает время затухания автокорреляционных функций. По всем реализациям вычисляли оценки математических ожиданий \tilde{m}_z , средних квадратичных отклонений $\tilde{\sigma}_z$ и дисперсий \tilde{D}_z единичного результата при N изменениях и средних квадратичных отклонений $\tilde{\sigma}_z(\tilde{m})$ и дисперсий $\tilde{D}_z(\tilde{m})$ оценок математических ожиданий для каждой переменной:

$$\begin{aligned} \tilde{m}_z &= \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N Z_K; \tilde{D}_z = \tilde{\sigma}_z^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{K=1}^N (Z_K - \tilde{m}_z)^2; \\ \tilde{D}_z(\tilde{m}) &= \frac{1}{N} \tilde{\sigma}_z^2; \tilde{\sigma}_z(\tilde{m}) = \frac{\tilde{\sigma}_z}{\sqrt{N}}. \end{aligned} \quad (5)$$

После этого платформа вращалась в противоположную сторону:

$$\omega_1 \approx 3,51^\circ/\text{с}; \omega_2 \approx -3,51^\circ/\text{с}; \omega_3 \approx 2,86^\circ/\text{с}.$$

Применение алгоритма (3), (4) позволило снизить погрешности определения среднего значения угловой скорости. По множеству реализаций мате-

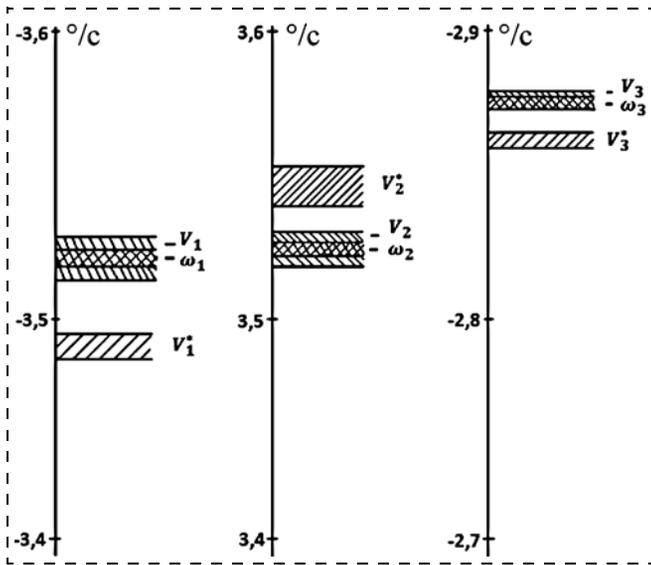


Рис. 2. Доверительные интервалы

матические ожидания погрешностей определения ω_j ($j = 1, 2, 3$) снизились с 0,68 до 0,013 % для компоненты ω_1 , с 0,58 до 0,0052 % — для ω_2 , с 0,6 до 0,0066 % — для ω_3 , т. е. в 52,3, 111,54 и 90,9 раз соответственно. При этом дисперсия значений V_j , вычисленных по алгоритму (3), (4), по отношению к дисперсии показаний ГИУС V_j^* практически не возросла.

Оценим максимально возможные ошибки определения компонент угловой скорости в данных экспериментах. С вероятностью 0,997 показания блока гироскопов V_j^* , а также значения ω_j и V_j будут находиться в интервалах $\tilde{m}_z \pm 3\tilde{\sigma}_z(\tilde{m})$ [4]. На рис. 2 доверительные интервалы изображены графически отдельно для каждой компоненты. Для $\omega < 0$ можно утверждать, что с вероятностью 0,997 максимальные ошибки определения заданных компонент угловой скорости по алгоритму (3), (4) не превысят 0,0416 %, 0,0748 %, 0,0269 %. Максимально возможные погрешности ГИУС составили 0,6959 %, 0,6488 %, 0,6136 %.

Минимально возможные погрешности самих ГИУС составили 0,6433 %, 0,5076 %, 0,5736 %, т. е. в этом случае общие погрешности ГИУС снижены, по крайней мере, в 15,2, 6,7, 21,3 раз.

При $\omega > 0$ минимальные погрешности ГИУС составляют 0,5759 %, 0,3526 %, 0,5568 %. Наибольшие возможные погрешности алгоритма (3), (4) составляют 0,1086 %, 0,187 %, 0,0508 %. Погрешности ГИУС снижены, по крайней мере, в 5,3, 1,9 и 11 раз. Увеличение дисперсии в показаниях ГИУС и решениях V_j при $\omega > 0$ объясняется большей нестабильностью вращения платформы УПГ в эту сторону (дисперсия по ω_j ($j = 1, 2, 3$) в этом случае также возросла на порядок).

На третьем этапе экспериментально исследовали эффективность компенсации погрешностей блока ГИУС в динамических режимах. При этом в алго-

ритме обработки информации гироскопов (3), (4) были учтены члены, содержащие производные углов относительных поворотов гироблоков:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \frac{U_M^1}{K_M^1} + K_\beta^1 \dot{\beta}^1 + K_{\ddot{\beta}}^1 \ddot{\beta}^1; \\
 P_2 &= \frac{U_M^2}{K_M^2} + K_\beta^2 \dot{\beta}^2 + K_{\ddot{\beta}}^2 \ddot{\beta}^2; \\
 P_3 &= \frac{U_M^3}{K_M^3} + K_\beta^3 \dot{\beta}^3 + K_{\ddot{\beta}}^3 \ddot{\beta}^3.
 \end{aligned} \quad (6)$$

Коэффициенты K_β^i , $K_{\ddot{\beta}}^i$ в первом приближении задавали в соответствии с номинальными значениями параметров ГИУС $K_\beta^i = 0,0133$, $K_{\ddot{\beta}}^i = 0,0016$ с, а затем уточняли путем сопоставления кривых переходных процессов $V_j(t)$, $V_j^*(t)$ при ступенчатом изменении угловой скорости, имитируемом датчиками моментов ГИУС.

Переходные процессы в каждом ГИУС, задаваемые токами имитации в дополнительных обмотках датчиков моментов, записывались в память ЦВМ.

Мгновенные значения напряжений U_M^i , U_β^i ($i = 1, 2, 3$) снимались с частотой 500 Гц. Затем в каждой точке по формулам разделенных разностей соответствующих порядков вычислялись оценки производных $\dot{\beta}^i$, $\ddot{\beta}^i$ и значения угловых скоростей, имитируемых датчиками моментов. Последние определялись как обычным образом по U_M^i ($i = 1, 2, 3$), так и по алгоритму (3), (6), обеспечивающему снижение динамических погрешностей блока ГИУС. Введение информации по первой и второй производным позволило снизить время первого согласования с 0,022 до 0,014 с, перерегулирование — с 52,78 до 6,95 %. Если учесть задержку сигнала U_β^i в фильтрах нижних частот установки (0,01 с), то время переходного процесса было снижено в 5,5 раз. Вместе с тем, шум квантования сигналов U_β^i по уровню в 12-разрядных АЦП экспериментальной установки приводил к увеличению дисперсии оценок угловой скорости в установившемся режиме, поскольку изменению сигналов U_β^i ($i = 1, 2, 3$) на 0,5 мВ при периоде квантования $T = 0,002$ с соответствуют $\dot{\beta}^i = 0,207^\circ/\text{с}$ и $\ddot{\beta}^i = 206,6^\circ/\text{с}^2$. Учитывая коэффициенты K_β^i , $K_{\ddot{\beta}}^i$, получаем угловые скорости 0,0028 и 0,3306°/с, соответственно, что составляет 0,04 и 5,2 % от $\omega = 6^\circ/\text{с}$. Для снижения дисперсии

в алгоритм обработки был введен пороговый фильтр, который устанавливал $\ddot{\beta}^i \equiv 0$ при изменениях выходных сигналов АЦП на 1 МЗР, соответствующую $U_{\beta}^i = 0,5$ мВ. Это позволило снизить влияние шумов квантования при одновременном повышении качества переходных процессов в оценках.

На заключительном этапе оценивали эффективность компенсации методических погрешностей блока ГИУС при определении мгновенных значений трех компонент вектора угловой скорости платформы, модуль которого изменялся по стационарным случайным законам с математическими ожиданиями, равными $1^\circ/\text{с}$, $2^\circ/\text{с}$, ..., $7^\circ/\text{с}$. Текущие значения $\omega_j(t)$ вычисляли с шагом $0,004$ с. На рис. 3–5 приведены графики изменения компонент угловой

скорости и величин V_j , V_j^* на отрезке времени $t = 0, 2 \dots 0,4$ с в одной из реализаций. Точки кривых $V_j^*(t)$ определяли непосредственно по показаниям U_M^i ГИУС. Кривые $V_j(t)$ получены по алгоритмам (3), (6).

На рис. 6–8 приведены графики изменения относительных погрешностей до компенсации $\Delta\omega_j(t)$ и после $\delta\omega_j(t)$.

Интегральные оценки погрешностей вычисляли по формулам

$$\delta V_j^* = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} |\Delta\omega_j(t)| dt; \quad \delta V_j = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} |\delta\omega_j(t)| dt$$

($j = 1, 2, 3$).

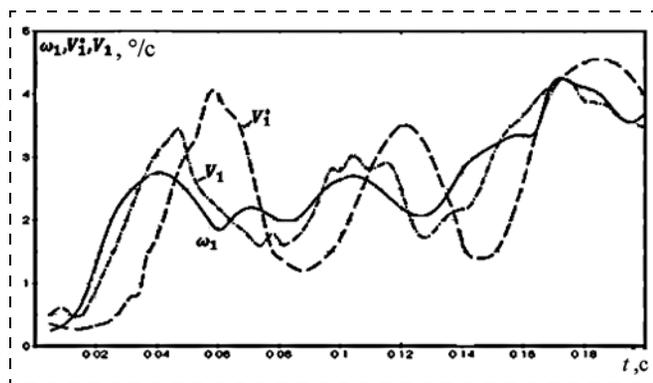


Рис. 3. Графики угловой скорости ω_1 и ее оценок

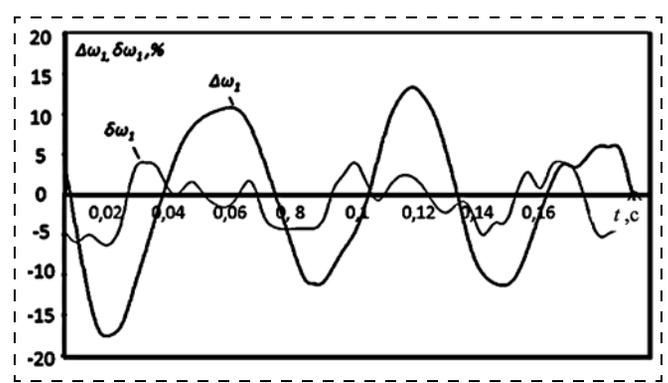


Рис. 6. Графики погрешностей определения ω_1

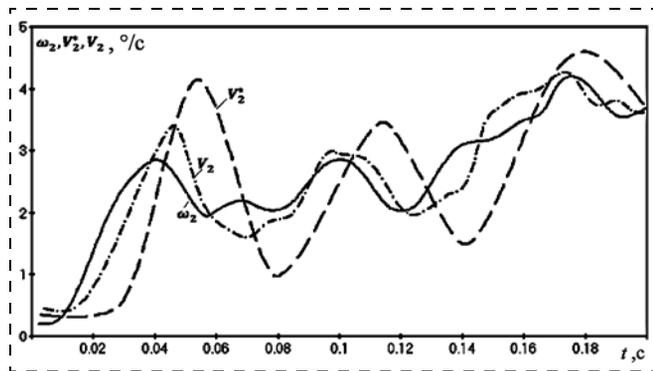


Рис. 4. Графики угловой скорости ω_2 и ее оценок

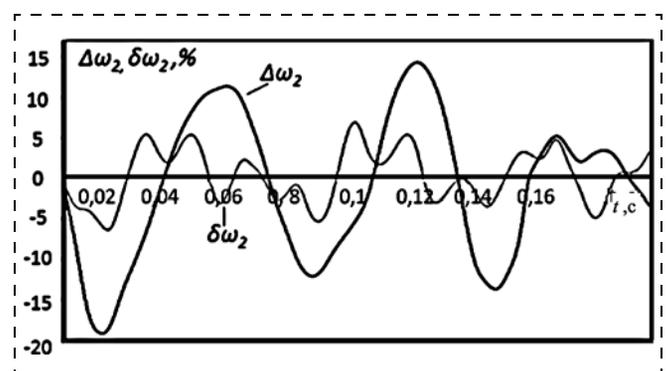


Рис. 7. Графики погрешностей определения ω_2

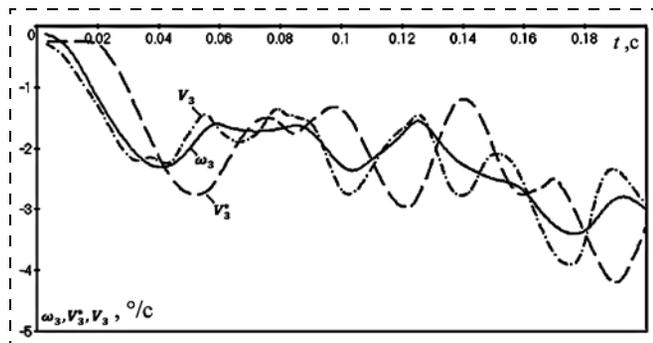


Рис. 5. Графики угловой скорости ω_3 и ее оценок

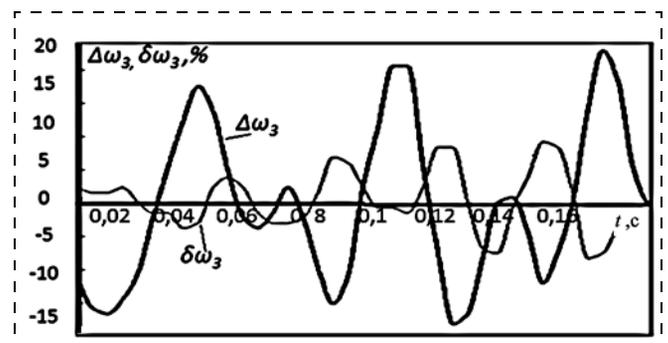


Рис. 8. Графики погрешностей определения ω_3

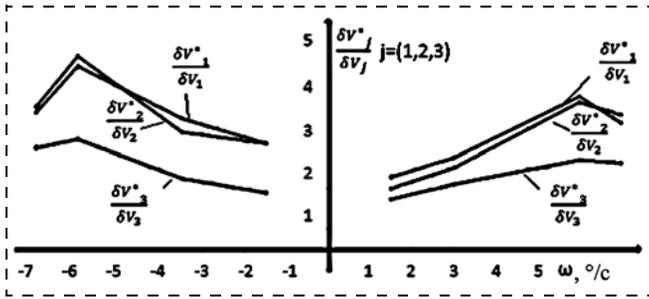


Рис. 9. Отношения погрешностей до и после компенсации

Для данной реализации угловой скорости вращения платформы $\omega_j = \langle \omega_j \rangle + \omega'_j$; ($j = 1, 2, 3$), где $\langle \omega_1 \rangle = \langle \omega_2 \rangle \approx 4,5^\circ/\text{с}$, $\langle \omega_3 \rangle \approx -3,8^\circ/\text{с}$; ω'_j — случайные составляющие амплитудой до $0,8^\circ/\text{с}$ и частотой до 15 Гц, суммарные погрешности блока ГИУС без компенсации погрешности составили

$$\delta V_1^* = 36 \%, \delta V_2^* = 33,8 \%, \delta V_3^* = 21,8 \%,$$

а после компенсации — 17,2 %, 13,7 % и 12 % соответственно, т. е. погрешности снижены по интегральным оценкам в 2,1; 2,47 и 1,82 раза. Подобные отношения вычисляли и при других угловых скоростях вращения платформы. На рис. 9 представлены графики изменения отношений погрешностей δV_j^* и δV_j^* в зависимости от угловой скорости. Видно, что при ω_j от 1 до $7^\circ/\text{с}$ суммарные погрешности снижены от 1,3 до 4,2 раз.

Заключение

1. С помощью моделирования работы блока ГИУС проведена оценка их методических погрешностей и возможной точности компенсации этих погрешностей алгоритмическим способом.

Методические погрешности ГИУС при измерении угловых скоростей составляют 1,93 %. Время

переходных процессов в ГИУС достигает $0,06 \text{ с}$, перегулирование 43 %. При измерении угловой скорости по гармоническому закону с частотой 2,5 Гц приведенная относительная погрешность определения ее мгновенных значений достигает 3,35 %.

При точном задании параметров блока гироскопов, точном съеме их выходных сигналов и вычислении производных углов относительных движений применение полного алгоритма теоретически позволяет снизить погрешности определения мгновенных значений переменной угловой скорости до $0,58 \cdot 10^{-4} \%$.

2. Экспериментальные результаты по компенсации погрешностей блока ГИУС показывают, что с помощью алгоритма (3), (6) можно снизить погрешности определения среднего значения компонент вектора угловой скорости примерно на порядок по множеству реализаций. При этом дисперсии вычисленных значений угловых скоростей по отношению к дисперсиям показаний ГИУС практически не возрастают. При определении мгновенных значений трех компонент вектора угловой скорости платформы, являющихся реализациями стационарных случайных процессов с математическими ожиданиями $1...7^\circ/\text{с}$, случайными составляющими с амплитудой до $0,8^\circ/\text{с}$ и частотой до 15 Гц, суммарные погрешности блока ГИУС были снижены в 1,3...4,2 раза.

Список литературы

1. Плотников П. К. К вопросу построения алгоритмов оценивания параметров движения по сигналам датчиков первичной информации // Изв. РАН. МТТ. 1990. № 1. С. 12—22.
2. Аleshkin В. В., Плотников П. К., Челноков Ю. Н. Определение конфигурации блока датчиков при асимптотическом оценивании параметров движения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 2. С. 60—65.
3. Бендат Дж., Пирсон А. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1971. 408 с.
4. Зайдель А. И. Элементарные оценки ошибок измерений. Л.: Наука, 1968. 96 с.

Experimental Confirmation of Reduction of Unit GEUS Errors Due to an Algorithmic Compensation

V. V. Aleshkin, aleshkinvv@ya.ru✉, P. K. Plotnikov, pribor@sstu.ru,
Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin, Saratov, 410052, Russian Federation

Corresponding author: Aleshkin Valery V., D. Sc., Professor,
Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin,
Saratov, 410052, Russian Federation, e-mail: aleshkinvv@ya.ru

Received on December 26, 2014

Accepted on February 12, 2015

Efficiency of the asymptotic approach to the problem of determination of the components of the vector of absolute angular velocity of an object by the data from a twofold unit of three gyroscopes was experimentally confirmed. Cinematic diagram of the gyroscopic block, algebraic algorithms, methods and results of the experiments were provided. At the first stage six measurement channels were calibrated, at the second stage the measurement accuracy of the constant components of the angular velocities within the range of $1...7 \text{ deg/s}$ was evaluated. At the third stage the effectiveness of the error compensation block in the dynamic mode was investigated experimentally. The components of the angular velocity presented realization of the stationary random

processes with a constant of 1...6 deg/s, random components with amplitudes up to 0,8 deg/s and frequency of 15 Hz. Therefore, methods of correlation analysis of the random processes were applied for the analysis of the experimental data. Application of the algorithms based on simplified equations of the inverse task for a block of three gyro angular velocity meters, allows us to significantly reduce the dc component and instantaneous values of the errors in estimation of the parameters of an object's motion.

Keywords: sensor block, methodological errors, algorithmic compensation, simplified algorithms, results of experiments

For citation:

Aleshkin V. V., Plotnikov P. K. Experimental Confirmation of Reduction of Unit GEUS Errors Due to an Algorithmic Compensation, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 9, pp. 637–642.

DOI: 10.17587/mau.16.637-642

References

1. Plotnikov P. K. *K voprosu postroeniya algoritmov otsenivaniya parametrov dvizheniya po signalam datchikov pervichnoi informatsii* (On the constructing estimation algorithms of motion parameters using

primary information sensor signals), *Izv. RAN. MTT*, 1990, no. 1, pp. 12–22.

2. Aleshkin V. V., Plotnikov P. K., Chelnokov Yu. N. *Opreделение konfiguratsii bloka datchikov pri asimptoticheskom otsenivani parametrov dvizheniya* (Defining the configuration of the sensor unit under asymptotic estimation of motion parameters), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 2, pp. 60–65.

3. Bendat J., Pirsol A. *Izmerenie i analiz sluchainykh protsessov* (Measurement and analysis of random processes), Moscow, Mir, 1971, 408 p.

4. Zaydel A. I. *Elementarnye otsenki oshibok izmerenii* (Elementary estimations of measurement errors), Leningrad, Nauka, 1968, 96 p.

УДК 629.73.533.6

DOI: 10.17587/mau.16.642-647

Е. С. Чувашева, ст. преподаватель, chuvashevalena@gmail.com,

С. Н. Чувашев, д-р физ.-мат. наук, проф., snchuv@mail.ru,

МАГИ имени К. Э. Циолковского

Об эффективности применения изобарических режимов на гиперзвуковых летательных аппаратах

С помощью разработанной комплексной модели высокоскоростных летательных аппаратов исследуется эффективность применения системы снижения аэродинамического сопротивления на основе активного воздействия на гиперзвуковой поток путем инъекции легкого газа в изобарическом режиме. Сравнение с аппаратом, в котором соответствующее аэродинамическое сопротивление компенсируется двигателем, показало, что применение указанной системы может существенно (примерно вдвое) снизить стартовую массу аппарата.

Ключевые слова: высокоскоростные летательные аппараты, аэродинамическое сопротивление, активное воздействие, изобарический режим, комплексные модели

Введение

К настоящему времени традиционные подходы к улучшению аэродинамических характеристик высокоскоростных летательных аппаратов различного назначения, основанные на оптимизации формы поверхности летательного аппарата (ЛА), в значительной степени исчерпаны. Вместе с тем, необходимость радикального повышения летных качеств летательных аппаратов, в частности, снижения аэродинамического сопротивления, ощущается весьма остро. Для гиперзвуковых ЛА (ГЛА) существенным также является ограничение нагрева поверхности.

Для снижения волнового сопротивления можно было бы уменьшать до очень малых значений углы наклона поверхностей ЛА относительно направления потока, но при заданном полезном объеме ЛА это привело бы к быстрому нарастанию сил трения. Оптимальные с точки зрения минимизации суммы волнового сопротивления и сил трения формы соответствуют значительным углам наклона поверх-

ностей ЛА, соответствующим многократному росту давления на поверхности относительно давления среды p_∞ . Но и эти оптимизированные с силовой точки зрения формы часто не делают из-за больших тепловых потоков на окрестности критических точек: для ограничения мощности нагрева острые вершины и кромки часто затапливают. Это приводит, однако, к росту волнового сопротивления.

Надежды на решение указанных проблем в значительной мере связаны с активным воздействием на аэродинамику путем инъекции массы и/или энергии. Критически важным для применения методов активного воздействия является такой выигрыш по сравнению с классическим методом снижения лобового сопротивления (применением заостренной формы носовой части), который превышает соответствующие энергозатраты на организацию активного воздействия: тогда можно говорить об общем энергетическом выигрыше от активного воздействия.

В работах [1–13] предложена концепция системы снижения лобового сопротивления ГЛА за счет

инжекции легкого газа (с большой скоростью звука, т. е. малой массой молекул и/или высокой температурой). Она позволяет заметно снизить энергозатраты на компенсацию потерь на аэродинамическое сопротивление и уменьшить массу стартового комплекса за счет снижения массы топлива для двигателя ГЛА. При выполнении ряда условий перед ГЛА формируется газовое или плазменное тело с большой скоростью звука, которое обтекается потоком без значительного повышения давления и без формирования там высокоскоростных потоков; существенно снижается давление на носовой части ГЛА, что уменьшает волновое сопротивление, а легкий газ обволакивает боковые поверхности ГЛА так, что значительно снижает там силы трения. В результате достижимы режимы, при которых энергозатраты на активное воздействие ниже, чем экономия энергии на создание тяги за счет снижения сопротивления. Для этого имеются два варианта: профилированное выделение энергии (газовое или плазменное тело из нагретого воздуха) или профилированная инжекция легкого газа, возможно, предварительно нагретого (газовое или плазменное тело из легкого газа). Принципиальным для реализации указанных эффективных режимов является формирование протяженной зоны с высокой скоростью звука (т. е. большой температурой и/или малой молекулярной массой), в которой практически выравнивается давление, причем на весьма низком уровне, а потому снижается давление на носовую часть аппарата, определяющее лобовое сопротивление.

Вначале этот класс режимов был предсказан аналитически для случая профилированного энерговыделения перед телом (скорость звука повышается при нагреве воздуха), затем его существование было доказано с помощью математического моделирования. Затем этот класс режимов был расширен на случай профилированного вдува перед телом легкого газа (скорость звука повышается и из-за нагрева, и из-за малой молекулярной массы). Сначала были сформулированы достаточные условия, а затем получено доказательство с помощью математического моделирования. В расчетах было получено многократное снижение лобового сопротивления и многократное снижение энергозатрат на полет по сравнению не только с затупленной, но и с заостренной, оптимизированной формой обтекаемого тела без активного воздействия.

В ряде случаев из конструктивных соображений предпочтительна форма ГЛА, близкая к цилиндрической. Анализ показывает, что для применения системы снижения сопротивления на основе изобарических режимов предпочтительна многогранная форма.

Из формулы Циолковского можно получить, что масса необходимого горючего для стартового комплекса пропорциональна конечной массе летательного аппарата. Уменьшение лобового сопротивления, таким образом, позволяет снизить массу стартового комплекса: при наличии системы снижения

лобового сопротивления нет необходимости компенсировать его тягой двигателя, т. е. топливо ГЛА не понадобится, а запас газа, необходимый для выполнения аналогичных миссий, может иметь меньшую массу. Таким образом, можно пропорционально уменьшить массу горючего для стартового комплекса, заменив двигатель системой снижения лобового сопротивления.

Однако интенсивная инжекция требует значительных запасов газа.

Представляет интерес вопрос, как применение системы снижения лобового сопротивления повлияет на стартовую массу летательного аппарата с учетом массы конструкции, условий полета, характеристик заменяемого двигателя и пр. Для этого целесообразно проведение комплексного математического моделирования полета ГЛА при некоторой заданной миссии, подобного, например, приведенному в работах [14, 15].

В данной работе представлены результаты расчетов в соответствии с разработанной комплексной моделью для ГЛА с системой снижения лобового сопротивления и сравнения с ГЛА с обычным гиперзвуковым обтеканием и двигателем для компенсации аэродинамического торможения.

1. Математическая модель

Рассматривается полет ГЛА в атмосфере в системе координат x, y, z , связанной с Землей (ось Oz направлена вверх). Решается система уравнений для координат и проекций скорости ГЛА [16]:

$$\frac{dz}{dt} = v_z, \quad M \frac{dv_z}{dt} = A_z - Mg,$$

$$\frac{dx}{dt} = v_x, \quad M \frac{dv_x}{dt} = A_x,$$

$$\frac{dy}{dt} = v_y, \quad M \frac{dv_y}{dt} = A_y,$$

где M — масса аппарата, равная сумме массы конструкции и массы топлива ($M = M_{steel} + M_{fuel}$); g — ускорение свободного падения; $v = (v_x, v_y, v_z)$ — вектор скорости; $A = (A_x, A_y, A_z)$ — вектор аэродинамической силы.

Изменение массы летательного аппарата с твердотопливным двигателем описывается формулой

$$\frac{dM_{fuel}}{dt} = -m,$$

для аппарата с системой снижения лобового сопротивления — формулой

$$\frac{dM_{He}}{dt} = -m_{He},$$

где m — расход горючего, m_{He} — расход инжектируемого газа (гелия).

Расход горючего рассчитывается по формуле

$$m = M_{fuel0}/t_{engine}$$

где M_{fuel0} — начальная масса топлива, t_{engine} — время работы двигателя.

Расход инжектируемого газа рассчитывается следующим образом:

$$m_{He} = \rho_{He} v_{He} L_{He}$$

где ρ_{He} , v_{He} , L_{He} — соответственно плотность, скорость и толщина слоя газа.

Аэродинамические структуры, формирующиеся в обтекающем потоке, на основе представлений работы [17] об обтекании тел подобной геометрии описывали с помощью точных и приближенных аналитических решений и полуэмпирических соотношений, каждое из которых ранее многократно проверялось и сверялось с экспериментальными данными: течения конические автотельные, соотношения за наклонными ударными волнами, течения Прандтля—Майера, уравнения для одномерного течения в каналах, полуэмпирические соотношения для течения у критических точек.

Для гиперзвукового обтекания носовых частей ГЛА как частей затупленного тела применяли полуэмпирические соотношения [18]: локальный коэффициент теплоотдачи

$$q = \alpha(T_r - T_w),$$

где

$$T_r = T_\delta [1 + r M_\delta^2 (\gamma(T^*) - 1)/2],$$

здесь при ламинарном погранслое

$$\alpha = \alpha_l = 0,325 C_p(T^*) \rho(T^*) v_\delta \text{Re}_x^{-1/2} \text{Pr}^{-2/3},$$

при турбулентном погранслое

$$\alpha = \alpha_t = 0,029 C_p(T^*) \rho(T^*) v_\delta \text{Re}_x^{-1/5} \text{Pr}^{-2/3},$$

$$\text{Re}_x = v_\delta x / \nu(T^*),$$

T_r — температура восстановления; r — коэффициент восстановления температуры; $r = 0,9$, T_w — температура стенки; M_δ — число Маха в потоке на границе погранслоя; Re_x — число Рейнольдса; Pr — число Прандтля; v_δ — скорость на границе погранслоя; x — координата вдоль поверхности; $C_p(T^*)$ — теплоемкость; $\rho(T^*)$ — плотность; $\nu(T^*)$ — вязкость; $\gamma(T^*)$ — показатель адиабаты в потоке, вычисляемые при определяющей температуре

$$T^* = (T_\infty + T_w)/2 + 0,22(T_r - T_\infty),$$

T_δ — температура на границе погранслоя, T_∞ — температура в потоке.

Сила трения на единицу площади рассчитывается соответственно по формулам для ламинарного и турбулентного потоков:

$$\tau_l = 0,325 \text{Re}_x^{-1/2} \text{Pr}^{-2/3} \text{Pr}^{0,6} \rho(T^*) v_\delta^2;$$

$$\tau_t = 0,029 \text{Re}_x^{-1/5} \text{Pr}^{-2/3} \text{Pr}^{0,6} \rho(T^*) v_\delta^2.$$

При инжекции трение в носовой части отсутствует.

Характеристики потока на границе погранслоя рассчитываются по формулам для течения Прандтля—Майера или ударной волны (в зависимости от направления скорости) [19].

При обтекании выпуклого тупого угла сверхзвуковым потоком образуется течение Прандтля—Майера. Число Маха возмущенного потока M_2 находится из уравнения

$$\theta_0 + \sqrt{(k+1)/(k-1)} \arctg \sqrt{(k-1)/(k+1)} \sqrt{M_1^2 - 1} - \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \arctg \sqrt{\frac{k-1}{k+1}} \sqrt{M_2^2 - 1} = 0,$$

где θ_0 — угол поворота потока; k — показатель адиабаты газа; M_1 — число Маха невозмущенного потока.

Пользуясь основными соотношениями для изэнтропических течений, можно определить давление, плотность и температуру [18]:

$$p_0 = p_1 \left(1 + \frac{k-1}{2} M_1^2\right)^{\frac{k}{k-1}};$$

$$T_0 = T_1 \left(1 + \frac{k-1}{2} M_1^2\right);$$

$$\rho_0 = \rho_1 \left(1 + \frac{k-1}{2} M_1^2\right)^{\frac{k}{k-1}};$$

$$T_2 = \frac{T_0}{\left(1 + \frac{k-1}{2} M_2^2\right)};$$

$$p_2 = p_0 \left(1 + \frac{k-1}{2} M_2^2\right)^{\frac{k}{k-1}},$$

где индекс 0 имеют параметры торможения, индекс 2 — параметры возмущенного потока.

Характеристики потока за ударными волнами рассчитываются по следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(\nu_1 - \omega_1) &= \\ &= \{(\gamma - 1)/(\gamma + 1) + 2/[(\gamma + 1)M_1^2 \sin(\nu_1)^2]\} \operatorname{tg}(\nu_1); \\ p_2/p_1 &= [2\gamma M_1^2 \sin(\nu_1)^2 - (\gamma - 1)]/(\gamma + 1), \\ \rho_2/\rho_1 &= [M_1^2 \sin(\nu_1)^2 (\gamma + 1)]/[2 + (\gamma - 1)M_1^2 \sin(\nu_1)^2]; \\ v_2^2/v_1^2 &= 1 - \sin(\nu_1)^2 + \\ &+ \sin(\nu_1)^2 \{2/[(\gamma + 1)M_1^2 \sin(\nu_1)^2] + (\gamma - 1)/(\gamma + 1)\}^2; \\ T_2/T_1 &= [2\gamma M_1^2 \sin(\nu_1)^2 - \\ &- (\gamma - 1)]\{2/[(M_1^2 \sin(\nu_1)^2] + (\gamma - 1)\}/(\gamma + 1)^2, \end{aligned}$$

здесь ω_1 — угол наклона стенки к потоку, ν_1 — угол наклона ударной волны к потоку, индекс 1 соответствует невозмущенному потоку, индекс 2 — потоку за ударной волной, p , ρ , v , T — давление, плотность, скорость и температура, γ — показатель адиабаты.

Вышеприведенная комплексная модель описывает аэродинамику гиперзвукового обтекания и динамику движения рассматриваемых летательных аппаратов.

2. Результаты расчетов по комплексной модели

Рассмотрим для примера ГЛА (рис. 1), имеющий симметричную форму с порядком симметрии 3 (т. е. треугольного в сечении). Носовая часть представляет собой пирамиду, центральная часть — призму, задняя часть — пирамиду, в основании которых лежат правильные многоугольники.

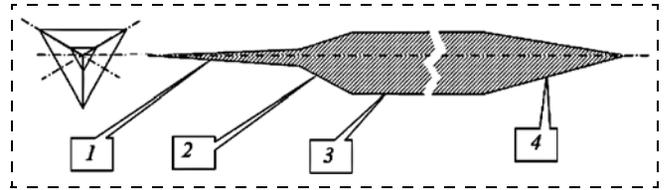


Рис. 1. Форма ГЛА с системой снижения аэродинамического сопротивления: вид спереди и вертикальное сечение: 1 — поверхность протяженного тела на носу; 2 — лобовая часть поверхности ГЛА; 3 — боковая часть поверхности ГЛА; 4 — задняя часть поверхности ГЛА

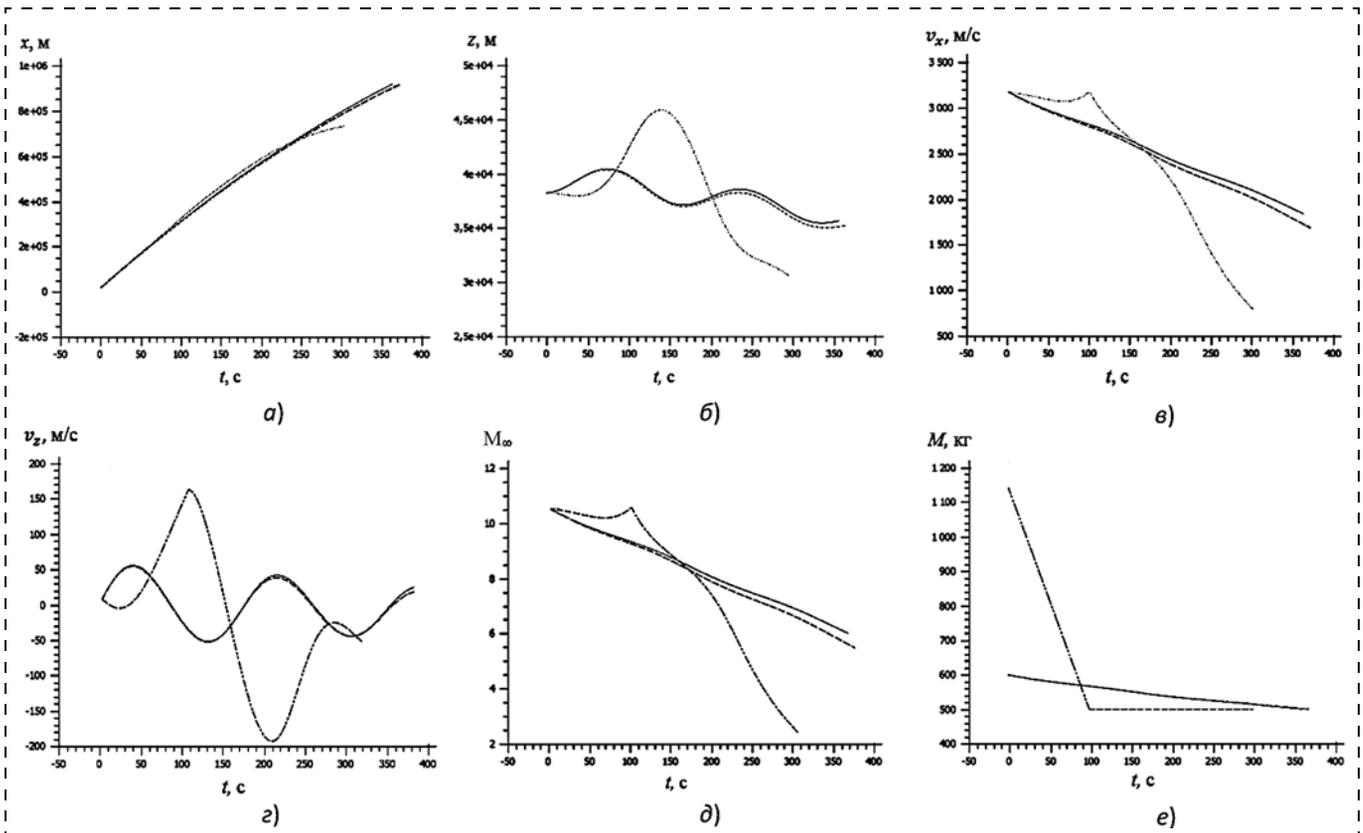


Рис. 2. Расчетные временные зависимости:

a — дальности полета, м; b — высоты полета, м; c — горизонтальной скорости полета, м/с; d — вертикальной скорости полета, м/с; e — числа Маха; e — массы аппарата, кг (штрихпунктирная линия — для аппарата с твердотопливным двигателем, штриховая — для аппарата с системой снижения лобового сопротивления, погранслюй на боковой поверхности заполнен воздухом, сплошная — для аппарата с системой снижения лобового сопротивления, погранслюй на боковой поверхности заполнен инжектированным газом)

Представлены результаты трех расчетов по комплексной модели:

1) ГЛА с твердотопливным двигателем, компенсирующим большую часть аэродинамического сопротивления;

2) ГЛА с системой снижения аэродинамического сопротивления, причем не учитывается поступление инжектированного газа в погранслои на боковой поверхности ГЛА;

3) ГЛА с системой снижения аэродинамического сопротивления, причем считается, что погранслои на боковой поверхности ГЛА заполнены только инжектированным газом, что влияет на силу трения в этой части.

В действительности в погранслои центральной части аппарата попадает некоторая часть газа, и результаты для ГЛА с системой снижения аэродинамического сопротивления должны находиться между результатами для 2-го и 3-го случаев.

В данной работе представлены расчеты для ГЛА, имеющего следующие параметры: радиус описанной окружности сечения центральной части аппарата 0,773 м, длина носовой части 0,81 м, длина центральной части 4,57 м, длина задней части 0,81 м, длина инжектора 2,33 м. Масса горючего для аппарата с двигателем 646 кг, масса запаса инжектируемого газа для аппарата со снижением сопротивления 100 кг, температура воздуха 223 К, температура инжектируемого гелия 1000 К, угол атаки 3° для аппарата с двигателем и 4° — для аппарата с инъекцией, эффективная толщина слоя инжектируемого газа (гелия) над центральной частью $L_{He} = 0,04$ м.

Из результатов (рис. 2) можно увидеть, что случаи 2 и 3 различаются весьма незначительно, т. е. в данном случае ошибка от неопределенности в степени перемешивания газа и воздуха у боковой поверхности ГЛА невелика.

ГЛА с системой снижения лобового сопротивления выполняет миссию не хуже ГЛА с двигателем, но позволяет почти вдвое (на ≈ 550 кг) уменьшить массу стартового комплекса и соответственно во столько же раз уменьшить массу горючего, необходимого для разгона ГЛА (на $\approx 2,5$ т).

Итак, можно заключить, что имеются конструкции и миссии, когда имеет смысл замена двигателя на систему снижения лобового сопротивления, так как при этом достигается существенное снижение стартовой массы аппарата.

Список литературы

1. Александров А. Ф., Арделян Н. В., Тимофеев И. Б., Чувашев С. Н. О возможности существенного снижения энергозатрат на сверх- и гиперзвуковое движение при нагреве воздуха и/или вдуве плазмы // XXVI звенигородская конференция по физике плазмы и УТС: 1999. С. 252.
2. Арделян Н. В., Чувашев С. Н. Математическое моделирование безударных режимов сверхзвукового обтекания при

профилированном нагреве газа // XXVI звенигородская конференция по физике плазмы и УТС: 1999. С. 261.

3. Арделян Н. В., Космачевский К. В., Чувашев С. Н. Математическое моделирование энергетически эффективных режимов сверхзвукового движения летательного аппарата с вдувом плазмы (газа) из иглы на носу // XXVI звенигородская конференция по физике плазмы и УТС: 1999. С. 264.

4. Chuvashov S., Ardelyan N., Chae J., Kosmachevskii K., Timofeev I. Class of energy saving regimes of supersonic propagation with plasma formation before streamlined bodies // 9-th int. Space planes and hypersonic systems and technologies conference. 3-rd weakly ionized gases symposium. AIAA-99-4968. Norfolk, Virginia, USA. 1999. P. 285—296.

5. Александров А. Ф., Тимофеев И. Б., Чувашев С. Н. Безударное сверхзвуковое движение в атмосфере: принципиальная возможность и практическая реализация. М.: Изд. МГУ, 1996. 9 с. (препринт физического факультета № 4/1996).

6. Александров А. Ф., Тимофеев И. Б., Чувашев С. Н. Безударное сверхзвуковое движение в атмосфере: принципиальная возможность и практическая реализация // Прикладная физика. 1996. № 3. С. 112—117.

7. Александров А. Ф., Тимофеев И. Б., Чувашев С. Н. О концепции обеспечения безударного сверхзвукового движения в атмосфере // 4-й межгосударственный симпозиум по радиационной плазмодинамике: тезисы докладов М.: МГТУ. 1997. С. 12—13.

8. Александров А. Ф., Тимофеев И. Б., Чувашев С. Н. Способ обеспечения безударного сверхзвукового движения летательного аппарата в атмосфере и летательный аппарат. Патент RU2107010 c1 b64c 21/02, 23/00, 30/00.

9. Ершов А. П., Розанов В. В., Сысоев Н. Н., Тимофеев И. Б., Чувашев С. Н., Шибков В. М. Наблюдение безударного сверхзвукового движения плазмы капиллярного разряда в атмосфере // 4-й межгосударственный симпозиум по радиационной плазмодинамике: М.: МГТУ, 1997. С. 122—123.

10. Ершов А. П., Тимофеев И. Б., Чувашев С. Н., Шибков В. М. Экспериментальная реализация формирования горячего канала и сверхзвукового движения плазменного тела в атмосфере без возбуждения ударных волн // 4-й межгосударственный симпозиум по радиационной плазмодинамике: М.: МГТУ, 1997. С. 124—125.

11. Чувашев С. Н., Любченко Ф. Н., Костенко О. Ф. Концепция космического аппарата с лучевой плазмообразующей системой для полетов по сверхнизким орбитам // 4 межгосударственный симпозиум по радиационной плазмодинамике: М.: МГТУ, 1997. С. 206—207.

12. Арделян Н. В., Чувашев С. Н. Вычислительные эксперименты по устранению сильных ударных волн и многократному снижению лобового сопротивления при сверхзвуковом движении тел в газах // Тр. 7-й Всеросс. Школы-семинара "Современные проблемы математического моделирования". Ростов-на-Дону. РГУ. 1997. С. 11—14.

13. Chuvashov S., Ershov A., Liagushin B., Timofeev V., Timofeev I. Ambient air modification for drag reduction. Similarity analysis results for modeling of weakly ionized plasma aerodynamics // Weakly ionized gases workshop: proc. Colorado: USAF Academy 1997. P. M3—M17.

14. Чувашева Е. С., Чувашев С. Н., Зорина И. Г. Комплексная математическая модель для концептуального проектирования высокоскоростных летательных аппаратов // Информационные технологии. 2012. № 11.

15. Чувашева Е. С., Чувашев С. Н. Выбор рациональных характеристик высокоскоростных летательных аппаратов разных масштабов на основе комплексной математической модели // Информационные технологии. 2013. № 8.

16. Бюшгенс Г. С., Студнев Р. В. Динамика самолета. Пространственное движение. М.: Машиностроение, 1983. 320 с.

17. Лунёв В. В. Гиперзвуковая аэродинамика. М.: Машиностроение, 1975. 328 с.

18. Аржаников Н. С., Садекова Г. С. Аэродинамика больших скоростей. М.: Высшая школа, 1965.

19. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1991. 600 с.

On Efficiency of Application of Isobaric Modes for Hypersonic Vehicles

E. S. Chuvashева, chuvashavalena@gmail.com✉, S. N. Chuvashев, snchuv@mail.ru,
MATI — Russian State Technological University named after Tziolkovsky, Moscow, 121552, Russian Federation

Corresponding author: Chuvashева E. S., Senior Lecturer,
MATI — Russian State Technological University named after Tziolkovsky,
Moscow, 121552, Russian Federation, e-mail: chuvashavalena@gmail.com

Received on November 06, 2014

Accepted on December 15, 2014

A system of hypersonic drag mitigation is proposed. It is based on injection of light and/or hot gas in a new, isobaric mode, in order to form a "gaseous fore body" and to protect the frontal part of the surface of a hypersonic vehicle from formation of the hypersonic boundary layer. The effectivity of application of the proposed system depends on whether the advantages of the drag mitigation outweigh the drawbacks of storing of the additional gas. The question was studied with help of complex (integral) modeling of the hypersonic flying vehicles. There were compared two designs of hypersonic vehicles, which were able to implement the same mission. One of the designs included a solid propellant rocket engine to compensate the hypersonic aerodynamic drag, the other one applied the system of hypersonic drag mitigation with a continuous injection of helium. The complex models took into account the internal (engine) and external gas dynamics with the shock wave drag and surface friction, flight dynamics in the exponential atmosphere, mass change, flight control, etc. Computations have demonstrated that the start mass of the first vehicle was approximately twice as big as that of the second one. An additional advantage of the system of hypersonic drag mitigation is a considerable growth of the available coolant, which can provide comfortable thermal onboard conditions. Thus, there are cases, for which it is advantageous to apply the proposed system of hypersonic drag mitigation.

Keywords: high speed flying vehicles, aerodynamic drag, active modification, isobaric regime, complex mathematical model

For citation:

Chuvashева E. S., Chuvashев S. N. On Efficiency of Application of Isobaric Modes for Hypersonic Vehicles, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 9, pp. 642–647.

DOI: 10.17587/mau.16.642-647

References

1. Aleksandrov A. F., Ardeljan N. V., Timofeev I. B., Chuvashев S. N. O vozmozhnosti sushhestvennogo snizheniya jenergozatrata na sverh- i giperzvukovoe dvizhenie pri nagreve vozduha i/ili vduve plazmy (On possibility of considerable energy saving at super- and hypersonic flight by heating air and/or plasma injection), *XXVI Zvenigorod Conf. on Plasma Physics and Controlled Fusion*, 1999, p. 252 (in Russian).
2. Ardeljan N. V., Chuvashев S. N. Matematicheskoe modelirovanie bezudarnykh rezhimov sverhzvukovogo obtekanija pri profilirovanom nagreve gaza (Computer simulation of shock-free modes of supersonic flow at profiled gas heating), *XXVI Zvenigorod Conf. on Plasma Physics and Controlled Fusion*, 1999, p. 261 (in Russian).
3. Ardeljan N. V., Kosmachevskij K. V., Chuvashев S. N. Matematicheskoe modelirovanie jenergeticheski jeffektivnykh rezhimov sverhzvukovogo dvizhenija letatel'nogo apparata s vduvom plazmy (gaza) iz igly na nosu (Computer simulation of energy saving modes of supersonic flight of vehicle with plasma (gas) injection from a spike on its nose), *XXVI Zvenigorod Conf. on Plasma Physics and Controlled Fusion*, 1999, p. 264 (in Russian).
4. Chuvashев S., Ardeljan N., Chae J., Kosmachevskij K., Timofeev I. Class of energy saving regimes of supersonic propagation with plasma formation before streamlined bodies, 9-th int. Space planes and hypersonic systems and technologies conference, *3-Rd Weakly Ionized Gases Symposium, AIAA-99-4968*, Norfolk, Virginia, USA, 1999, pp. 2.85...2.96.
5. Aleksandrov A. F., Timofeev I. B., Chuvashев S. N. Bezudarnoe sverhzvukovoe dvizhenie v atmosfere: principal'naja vozmozhnost' i prakticheskaja realizacija (Shock-free supersonic flight in atmosphere: possibility in principle, and practical implementation), Moscow, Moscow University Press, 1996, 9 p. (preprint of physics department no. 4/1996) (in Russian).
6. Aleksandrov A. F., Timofeev I. B., Chuvashев S. N. Bezudarnoe sverhzvukovoe dvizhenie v atmosfere: principal'naja vozmozhnost' i prakticheskaja realizacija (Shock-free supersonic flight in atmosphere: possibility in principle, and practical implementation), *Prikladnaja Fizika*, 1996, no. 3, pp. 112–117 (in Russian).
7. Aleksandrov A. F., Timofeev I. B., Chuvashев S. N. O koncepcii obespechenija bezudarnogo sverhzvukovogo dvizhenija v atmosfere (Concept of shock-free supersonic flight in atmosphere), *4-th Int. Symposium on Radiating Plasma Dynamics*, Moscow, Bauman MSTU, 1997, pp. 12–13 (in Russian).
8. Aleksandrov A. F., Timofeev I. B., Chuvashев S. N. Sposob obespechenija bezudarnogo sverhzvukovogo dvizhenija letatel'nogo aparata v atmosfere i letatel'nyj apparat (Method to provide shock-free supersonic flight of vehicle in atmosphere, and vehicle), Patent RU 2107010 c1 b64c 21/02, 23/00, 30/00 (in Russian).
9. Ershov A. P., Rozanov V. V., Sysoev N. N., Timofeev I. B., Chuvashев S. N., Shibkov V. M. Nabljudenie bezudarnogo sverhzvukovogo dvizhenija plazmy kapillarnogo razrjada v atmosfere (Observation of shock-free supersonic propagation of plasma of capillary discharge in atmosphere), *4-th Int. Symposium on Radiating Plasma Dynamics*, Moscow, Bauman MSTU, 1997, pp. 122–123 (in Russian).
10. Ershov A. P., Timofeev I. B., Chuvashев S. N., Shibkov V. M. Jeksperimental'naja realizacija formirovanija gorjachego kanala i sverhzvukovogo dvizhenija plazmennogo tela v atmosfere bez vozvuzhdenija udarnykh voln (Experimental implementation of formation of hot channel and supersonic propagation of plasma body in atmosphere without shock waves), *4-th Int. Symposium on Radiating Plasma Dynamics*, Moscow, Bauman MSTU, 1997, pp. 124–125 (in Russian).
11. Chuvashев S. N., Ljubchenko F. N., Kostenko O. F. Koncepcija kosmicheskogo apparata s luchevoj plazmoobrazujushhej sistemoj dlja poletoev po sverhnikskim orbitam (Concept of spacecraft with radiating system of plasma creation for very low orbit flights), *4-th Int. Symposium on Radiating Plasma Dynamics*, Moscow, Bauman MSTU, 1997, pp. 206–207 (in Russian).
12. Ardeljan N. V., Chuvashев S. N. Vychislitel'nye jeksperimenty po ustranjeniju sil'nyh udarnykh voln i mnogokratnomu snizheniju lobovogo soprotivlenija pri sverhzvukovom dvizhenii tel v gazah (Computational experiments on annihilation of strong shock waves and multiple drag mitigation at supersonic propagation of bodies in gases), *7th All-Russian Conference "Current Issues in Mathematical Modelling"*, Rostov-na-Donu, RSU, Proceedings, 1997, pp. 11–14 (in Russian).
13. Chuvashев S., Ershov A., Liagushin B., Timofeev B., Timofeev I. Ambient air modification for drag reduction. Similarity analysis results for modeling of weakly ionized plasma aerodynamics, *Weakly Ionized Gases Workshop: proc. Colorado: USAF Academy* 1997. P. M3–M17.
14. Chuvashева E. S., Chuvashев S. N., Zorina I. G. Complex Mathematical Model for Conceptual Design of High Speed Vehicles, *Informacionnyje Tehnologii*, 2012, no. 11, pp. 10–14 (in Russian).
15. Chuvashева E. S., Chuvashев S. N. Optimization of High Speed Vehicles with the Complex Mathematical, *Informacionnyje Tehnologii*, 2013, no. 8, pp. 12–16 (in Russian).
16. Bjushgens G. S., Studnev R. V. *Dinamika samoljota. Prostranstvennoe dvizhenie* (Dynamics of aircraft. Spatial movement), Moscow, Mashinostroenie, 1983, 320 p. (in Russian).
17. Lunjov V. V. *Giperzvukovaja ajerodinamika* (Hypersonic aerodynamics), Moscow, Mashinostroenie, 1975, 328 p. (in Russian).
18. Arzhanikov N. S., Sadekova G. S. *Ajerodinamika bol'shikh skorostej* (Aerodynamics of high speed), Moscow, Vysshaja shkola, 1965 (in Russian).
19. Abramovich G. N. *Prikladnaja gazovaja dinamika* (Applied gas dynamics), Moscow, Nauka, 1991, 600 p. (in Russian).



8—9 октября 2015 г. в Санкт-Петербурге состоится 26-я конференция "Экстремальная робототехника (ЭР-2015)", и в этом году ее проведение запланировано в стенах ГИЦ России "Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики" — головной организации отечественной робототехники и бессменного организатора конференции.

Более двадцати пяти лет конференция "Экстремальная робототехника" традиционно каждый год собирает на своей площадке ведущих российских специалистов, молодых ученых в области робототехники, аспирантов, студентов крупнейших технических университетов. В последние годы к ней привлечено внимание многих зарубежных специалистов, занимающихся разработками в области робототехнических средств безопасности, поэтому вот уже несколько лет подряд конференция по экстремальной робототехнике проходит в формате международного мероприятия. Это позволяет в "открытом поединке" максимально оценить национальные составляющие мирового научно-исследовательского потенциала в области создания средств технической кибернетики и робототехники космического, воздушного, наземного и морского базирования.

Тематика конференции, как всегда, охватывает широкий круг вопросов — от концептуальных проблем создания до практического применения уже существующих робототехнических комплексов. На конференции ЭР-2015 планируется рассмотреть актуальные вопросы, связанные с созданием робототехнических систем нового поколения для работы в экстремальных условиях и чрезвычайных ситуациях, включая борьбу с терроризмом, пожаротушение, решение оборонных задач, а также задач по освоению космоса и глубин Мирового океана, медицины, атомной энергетики и опасных производств.

Работа конференции запланирована в формате пленарных и секционных заседаний, дискуссий, круглых столов, посвященных актуальным проблемам и задачам в сфере робототехнических систем и средств безопасности.

Международная конференция "ЭР-2015" открыта для всех желающих, а их организатор — ЦНИИ робототехники и технической кибернетики — всегда рад новым участникам и гостям.

Подробная информация о конференции на сайте: <http://er.rtc.ru>.

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *Е. В. Комиссарова*.

Сдано в набор 02.07.2015. Подписано в печать 11.08.2015. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН915. 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.