

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ
И ПРИКЛАДНАЯ
ИНФОРМАТИКА
№ 1, 2015**

**SYSTEM ANALYSIS
AND APPLIED
INFORMATION SCIENCE
No 1, 2015**



**Международный
Научно-технический журнал**

Издается с декабря 2012 года

Учредитель

Белорусский национальный
технический университет

Главный редактор

Федор Иванович Пантелеенко

Редакционная коллегия

В. Ф. Голиков (зам. главного редактора),
В. А. Богущ, Т. В. Борботко, Р. Венерстен (Швеция),
В. А. Ганэ, Н. Н. Гурский, Ю. М. Захарик, Э. Г. Лазаревич,
А. А. Лобаты, В. А. Мищенко, А. Патрин (Польша),
И. А. Сатиков, В. В. Старовойтов, П. П. Урбанович,
А. Н. Чичко, В. Б. Байбурин (Россия),
Е. И. Никифорович (Украина)

**International
Science and Technique Journal**

Published since December, 2012

Founder

Belarusian National Technical
University

Editor-in-chief

Phyodor Panteleenko

Editorial board

V. Golikov (deputy editor-in-chief),
V. Bogush, T. Borbotko, P. Venersten (Sweden),
V. Ganeh, N. Gurskiy, J. Zaharik, E. Lazarevich,
A. Lobaty, V. Mishchenko, A. Patrin (Poland),
I. Satikov, V. Starovoytov, P. Urbanovich,
A. Chichko, V. Bayburin (Russia),
E. Nikiforovich (Ukraine)

Содержание

Contents

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

- Абуфанас А. С., Лобаты А. А.**
Беспилотный авиационный комплекс как сложная
мультиструктурная система 4
- Зильбергейт М. А., Рыжанкова А. С.**
Анализ устойчивости классификационных функ-
ций при обработке текстовой информации..... 10
- Прихожий А. А., Фролов О. М.**
Исследование планировщиков задач в Grid..... 15
- Листопад Н. И., Хайдер А. А., Михневич С. Ю.**
Сервис-ориентированный подход для оптимальной
маршрутизации информационных потоков в муль-
тисервисных сетях 24

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

- Шейх Эль Нажжарин М., Сеньков А. Г.**
Модель электротехнического объекта и алгоритм
управления на основе ПИД-регулятора 31
- Санкевич С. А., Петренко Ю. Н.**
Моделирование системы управления ветроэлектри-
ческой установки..... 35
- Яцкевич Ю. В., Кожедуб Ю. В.**
Компьютерная модель обтекания летательного апарата
воздушными потоками и расчет его аэродинамических
характеристик..... 41

SYSTEM ANALYSIS

- Abufanas A. S., Lobaty A. A.**
Unmanned aircraft systems as complex multistructural
system 4
- Silbergleit M. A., Ryzhankova A. C.**
Analysis of stability of the classifying rules processings
of text information..... 10
- PrihozhyA. A, Frolov O. M.**
Investigation of task scheduling in grid 15
- Listopad N. I., Haider A. A., Michnevich S. Y.**
Service-oriented approach for optimal routing of infor-
mation flows in multiservice networks 24

MANAGEMENT OF TECHNICAL OBJECTS

- Cheikh EL Najjarine M. H., Senkov A. G.**
A dynamic model of the electro-technical object and
its' regulation algorithm based on PID-controller..... 31
- Sankevich S. A., Petrenko Y. N.**
Simulation of inverter-based variable speed wind tur-
bine system..... 35
- Yatskevich Y. V., KozeDub Y. V.**
Computer model of an aircraft turbulent flow over and
calculation of it's aerodynamic characteristics 41

Касперович М. М., Кондратёнок В. А.

Результаты краткого сравнительного анализа математических моделей влияния ионосферы земли на сверхширокополосные сигналы x-диапазона 47

Шпургалов Ю. А., Шпургалова М. Ю.

Методика оптимизации параметров процесса дробления горных пород 53

**ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ
И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ****Старовойтов В. В.**

О цифровой реставрации исторических текстовых документов 60

Kasperovich M. M., Kondratyonok V. A.

Results of the short comparative analysis of mathematical models of influence of the ionosphere of the earth on ultra broadband signals x-range 47

Chpurgalov Y. A, Chpurgalova M. Y.

Method parameter optimization rock crushing. 53

**DATA PROCESSING
AND DECISION-MAKING****Starovoitov V. V.**

About the digital restoration of historical text documents 60

Ответственный секретарь редакции

Лакин В. И.

Адрес редакции

ул. Франциска Скорины 25/3, Минск, 220114,
Республика Беларусь

Тел. +375 17 267-66-84 e-mail:

CA_PI@bntu.by

Executive secretary of the editorial board

V. Lakin

Editorial board address

25/3 Franciska Skariny str., Minsk, 220114,
Republic of Belarus

Tel. +375 17 267-66-84 e-mail:

CA_PI@bntu.by

Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1540
от 08.06.2012, выданное Министерством информации Республики Беларусь

Подписано в печать 25.05.2015. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 7,91. Уч.-изд. л. 3,09. Тираж 100 экз. Заказ 463.

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

© Системный анализ и прикладная информатика, 2015

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

SYSTEM ANALYSIS

УДК 629.735.33

А. С. АБУФАНАС, А. А. ЛОБАТЫЙ, Белорусский национальный технический университет

БЕСПИЛОТНЫЙ АВИАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС КАК СЛОЖНАЯ МУЛЬТИСТРУКТУРНАЯ СИСТЕМА

Рассмотрены принципы построения математических моделей беспилотных авиационных комплексов как сложных систем, состоящих из совокупности подсистем, каждая из которых рассматривается как система. При этом взаимосвязи между подсистемами описываются с помощью топологических уравнений на основе теории графов, а для составления компонентных уравнений, описывающих динамику подсистем, предлагается использовать дифференциальные уравнения разрывного типа на основе теории систем случайной структуры.

The principles of constructing mathematical models of unmanned aircraft systems as complex systems consisting of a plurality of subsystems, each of which is considered as a system. In this case, the relationship between the subsystems are described by equations based on the topological graph theory, and for the preparation of component equations describing the dynamics of the subsystems is proposed to use differential equations discontinuous type based on systems theory of random structure.

Практически все современные самодвижущиеся системы, в частности беспилотный авиационный комплекс (БАК) или его составляющие, являются сложными системами, то есть представляют собой совокупность подсистем и элементов, объединенных функциональными связями, обеспечивающими решение задач, поставленных перед системой в целом. К тому же все эти реальные физические системы являются стохастическими, так как процессы, протекающие в них, являются случайными. Входящие в состав БАК беспилотные летательные аппараты (БЛА) являются эффективным средством для решения широкого спектра задач, как военного, так и народнохозяйственного характера. БЛА имеют большую перспективу применения в тех областях, где отсутствие пилота на борту позволяет сделать летательный аппарат более компактным и дешевым, а также при выполнении работ, связанных с риском для жизни и здоровья человека [1].

Достижения в области технологий микроэлектроники, информатики делают возможным решение задач по созданию БЛА различного назначения и конструктивной компоновки. Поэтому важным является разработка современных теоретических методов по обоснованию и синтезу систем управления (СУ) БЛА

как сложных динамических систем. Решение данных задач невозможно осуществить без соответствующих математических моделей БАК и их составляющих.

В основе формирования сложной системы лежит принцип многоуровневой функционально-целевой и причинно-следственной интеграции (композиции), что неизбежно находит свое отражение при переходе к математической модели данной системы. Сама сложная система может быть представлена в виде совокупности уравнений и системных графов различных уровней сложности [2]. Для наглядности восприятия математических зависимостей, описывающих в пространстве состояний сложные автоматические системы, определения ряда закономерностей их функционирования применяются представления этих систем в виде структурных схем скалярных или векторных.

В зависимости от поставленной исследователем задачи возможны различные подходы к представлению модели системы. Рассмотрим формализацию модели сложной технической системы на примере БАК. В общем случае БАК это совокупность устройств и элементов техники, включающей в себя БЛА, систему управления и наведения, навигационную си-

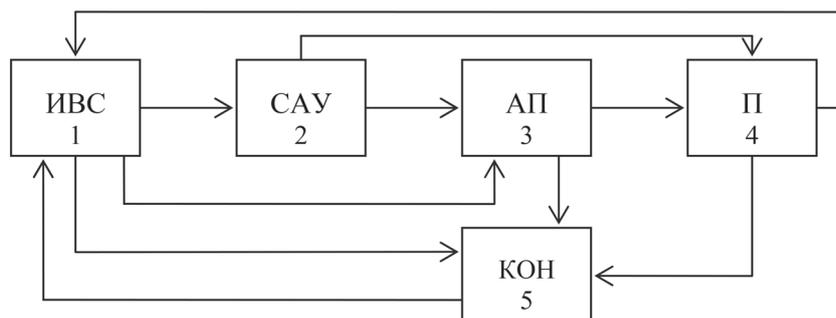


Рис. 1. Модель функционирования БАК

стему, а также средства их наземного обслуживания. БЛА является одной из составных частей БАК, включающего в себя целиком летательный аппарат (ЛА) вместе с составляющими его частными комплексами, наземную систему управления ЛА и все средства инженерно-авиационного и аэродромно-технического обеспечения. На уровне простейшей модели структурных связей БАК может быть представлен в виде структурной схемы без указания направления взаимного влияния подсистем. При построении функционально-целевых и причинно-следственных моделей сложных систем [3] на структурной схеме системы указываются направления взаимного влияния подсистем. Такая схема часто носит название модели функционирования системы. Для простейшей модели БАК она имеет вид, представленный на рис. 1, где обозначено: ИВС – информационно-вычислительная система; САУ – система автоматического управления; АП – автопилот; П – планер; КОН – комплекс ориентации и навигации.

При переходе к самому низкому (элементарному) уровню описания сложной системы ее модель представляется состоящей из простейших элементов C_1, C_2, \dots, C_n . При ее формализации удобно пользоваться так называемыми схемами сопряжения [4]. Поскольку для функционирования системы в данный момент времени необходимо наличие на входах соответствующих подсистем (элементов системы) набора определенных сигналов с соответствующими характеристиками, то модель сложной системы можно представить в виде набора из n C_j - x ($j = \overline{1, n}$) элементов, каждый из которых имеет m входных контактов для приема элементарных $x_i(j)$ входных сигналов и r выходных контактов для выдачи элементарных выходных сигналов $y_l(j)$. Внешние случайные

воздействия (шумы) ξ и детерминированные управления U могут быть представлены в виде фиктивного элемента C_0 , вход которого содержит m_0 входных контактов $x_i(0)$ а выход r_0 выходных контактов $y_l(0)$. С введением фиктивного элемента получается замкнутая система управления, динамика которой описывается переменными состояниями. В этом случае пространство состояний является фазовым пространством, а состояние системы в любой текущий момент времени характеризуется совокупностью фазовых координат, объединяемых в вектор состояния.

Для каждого элемента C_j математической модели, используемой для формального описания сопряжения его с прочими элементами системы и внешней средой, является пара множеств $[x_i(j)]^m$ и $[y_l(j)]^r$, где $[x_i(j)]^m$ ($i = \overline{0, m}$) – множество входных контактов, $[y_l(j)]^r$ ($l = \overline{0, r}$) – множество выходных контактов, C_j - x элементов системы. Каждому входному контакту $x_i(j)$ соответствует не более чем один выходной контакт $y_l(k)$, с которым он связан элементарным каналом. Поэтому можно ввести однозначный оператор, называемый оператором сопряжения R такой, что

$$y_l(k) = R(x_i(j)) \quad (1)$$

Совокупность множеств $[x_i(j)]^m, [y_l(j)]^r$ и оператора R называется схемой сопряжения элементов в системе C . Оператор R удобно задать в виде таблицы, в которой столбцы и строки нумеруются двойными номерами (i, j) и (l, k) соответственно, а на пересечениях помещаются единицы для контактов $x_i(j)$ и $y_l(k)$, соединенных элементарным каналом и ноль – в противном случае. Такие таблицы представляют собой матрицы смежности ориентированных графов, вершинами которых являются контакты, а ребрами – элементарные каналы.

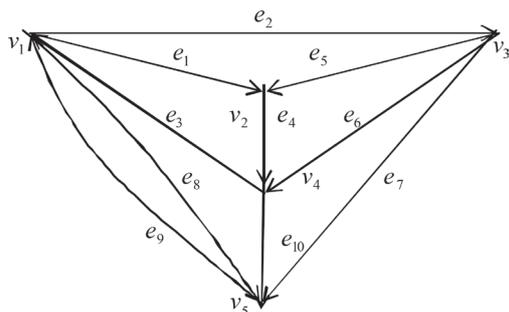


Рис. 2. Орграф модели функционирования БАК

Такой подход в представлении математической модели сложной системы при решении ряда задач применим и к моделям более высокого уровня.

Как видно на приведённом выше примере БАК (рис. 1), практически любой из элементов реальной сложной технической системы сам является сложной системой, то есть представляет собой подсистему C_μ системы C . При рассмотрении подсистемы C_μ как самостоятельной системы ее свойства описываются внутренним оператором сопряжения R_μ . При этом имеет место соответственно оператор сопряжения $R_{1\mu}$ подсистем C_μ в системе C . Возможно построение многоуровневых систем сопряжения с операторами сопряжения более высоких уровней R_{111} , R_{1V} и т. д. В общем случае для динамических систем операторы сопряжения зависят от времени и подчиняются внешним командам управления

$$Y_i(k) = R(X_i, j, t, U), \quad (2)$$

где t – непрерывная переменная времени, U – вектор управляющих воздействий.

Каждая из подсистем, входящая в состав сложной системы, описывается конкретным видом математических зависимостей. Как правило, это системы дифференциальных или разностных уравнений, которые называются компонентными уравнениями сложных систем. При этом оператор сопряжения, характеризующий характер связей между элементами сложной системы, описывается уравнениями, называемыми топологическими. Внезапные отказы, неисправности или повреждения БАК (сложной технической системы) приводят к скачкообразному изменению характера связей между подсистемами и характеристик самих подсистем. При переходе к математическим моделям это означает, что в случайные моменты времени существенно изменяются оператор

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
v_1	0	1	1	0	1
v_2	0	0	0	1	0
v_3	0	1	0	1	1
v_4	1	0	0	0	1
v_5	1	0	0	0	0

Рис. 3. Матрица смежности орграфа

сопряжения сложной системы и компонентные уравнения подсистем; т. е. имеет место сложная стохастическая мультиструктурная система [5].

Для математического описания (формализации) сложных систем, представленных в виде структурных схем, удобно использовать аппарат теории графов. При этом под графом понимается множество V вершин и набор E неупорядоченных и упорядоченных пар вершин; обозначается граф $G(V, E)$ [2]. Структурной схеме, представленной на рис. 1, соответствует ориентированный граф, содержащий упорядоченные пары вершин (орграф) $G(V, E)$ изображенный на рис. 2, где для данного примера $V = \{v_1, v_2, \dots, v_5\}$ – множество вершин графа; $E = \{e_1, e_2, \dots, e_{10}\}$ – множество ребер графа, в общем случае – непустое.

Нумерация вершин на рис. 2 соответствует нумерации элементов сложной системы (рис. 1). Нумерация ребер графа выбирается произвольно. Заметим, что иногда ребра ориентированного графа называют дугами. Для орграфа, представленного на рис. 2, матрица смежности представлена на рис. 3.

Матрица инцидентности представляет собой отношение между вершинами и ребрами. Строки матрицы соответствуют вершинам, а столбцы – ребрам. В случае орграфа ненулевой i, j элемент матрицы равен 1, если v_i – начальная вершина ребра e_j , и равен -1 , если v_i – конечная вершина ребра e_j . Для графа, представленного на рис. 2, матрица инцидентности представлена на рис. 4. В дальнейшем при изображении графов и написании матриц смежности и инцидентности обозначения v_i , v_j и v_i, e_j соответственно будем опускать.

Если на структурной схеме БАК (рис. 1) пренебречь взаимным влиянием подсистем, то этой схеме будет соответствовать неориентированный граф без указания направлений

	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	e_8	e_9	e_{10}
v_1	1	1	-1	0	0	0	0	1	-1	0
v_2	-1	0	0	1	-1	0	0	0	0	0
v_3	0	-1	0	0	1	1	1	0	0	0
v_4	0	0	1	-1	0	-1	0	0	0	1
v_5	0	0	0	0	0	0	-1	-1	1	-1

Рис. 4. Матрица инцидентности орграфа

$$V = \begin{array}{c|ccccc|c} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & \\ \hline & & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 2 \\ & & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 3 \\ & & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 4 \\ & & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 5 \\ \hline \end{array}$$

Рис. 6. Матрица смежности

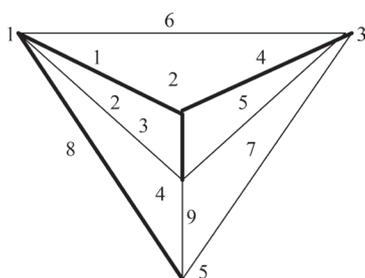


Рис. 8. Фундаментальное дерево графа

(рис. 5), для которого в соответствии с введенными на рисунке обозначениями имеют место матрица смежности (рис. 6) и матрица инцидентности (рис. 7).

Так как граф, представленный на рис. 5 неориентированный, то пары v_i, v_j неупорядочены так, что, $e_k = (v_i, v_j) = (v_j, v_i)$, следовательно, матрица смежности является симметричной.

При решении ряда задач необходимо определить матрицы сечений и контуров. Так, для графа, представленного на рис. 5 фундаментальное дерево графа (на рисунке выделено) представлено на рис. 8, где e_1, e_3, e_4, e_8 – ветви; e_2, e_5, e_6, e_7 – хорды дерева графа.

Матрица сечений, однозначно определяющая дерево графа, в канонической форме представлена на рис. 9. В другой форме $\Pi = \|1, \pi\|$, где π – матрица сечений для хорд.

В канонической форме матрица контуров представлена на рис. 10; или в другой форме $P = \|\rho, 1\|$ где ρ – матрица контуров для ветвей дерева графа.

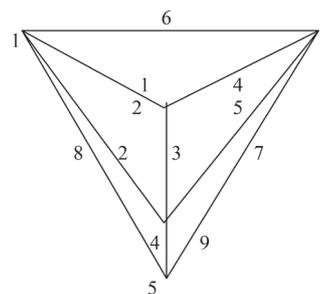


Рис. 5. Граф структурных связей

$$A = \begin{array}{c|ccccccccc|c} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & \\ \hline & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array}$$

Рис. 7. Матрица инцидентности структурных связей

$$\Pi = \begin{array}{c|cccc|cccc|c} & 1 & 3 & 4 & 8 & 2 & 5 & 6 & 7 & 9 & \\ \hline & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 3 \\ & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 4 \\ & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 8 \\ \hline \end{array}$$

Рис. 9. Матрица сечений дерева

$$P = \begin{array}{c|cccc|cccc|c} & 1 & 3 & 4 & 8 & 2 & 5 & 6 & 7 & 9 & \\ \hline & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 2 \\ & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 3 & 5 \\ & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 4 & 6 \\ & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 7 \\ & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 9 \\ \hline \end{array}$$

Рис. 10. Матрица контуров дерева

Для данного примера цикломатическое число графа [2] определяется выражением: $\sigma = q - p + 1 = 9 - 5 + 1 = 5$, где p – число вершин графа, q – число ребер графа.

В ряде случаев возникает необходимость использовать матрицы соседства вершин B и матрицы соседства ребер H , которые определяются следующим образом.

$$B = AA^T, H = A^T A, \quad (3)$$

где A – матрица инцидентности.

Для примера, представленного на рис. 5, матрица соседства вершин представлена на рис. 11, а матрица соседства ребер – на рис. 12.

$$B = \begin{array}{c|ccccc|c} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & \\ \hline & 4 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \hline & 1 & 3 & 1 & 1 & 0 & 2 \\ \hline & 1 & 1 & 4 & 1 & 1 & 3 \\ \hline & 1 & 1 & 1 & 4 & 1 & 4 \\ \hline & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 5 \end{array}$$

Рис. 11. Матрица соседства вершин

В матрице, представленной на рис. 11, диагональные элементы представляют степени соответствующих вершин (количество смежных вершин). Следовательно, матрицы B и H удобно использовать при описании входов элементов (подсистем) сложной системы. Так, количество входов подсистем определится как

$$\text{Tr}(B) = \text{Tr}(AA^T), \quad (4)$$

где $\text{Tr}(\dots)$ – след матрицы (сумма ее диагональных элементов).

Если элемент матрицы соседства ребер $a_{ij} = 0$, ($i, \neq j$), то это означает, что ребра i -е и j -е не имеют общей вершины. Если $a_{ij} = 0$, то это означает, что ребра i -е и j -е имеют общую вершину.

В некоторых случаях при исследовании сложных систем возникает необходимость отдельного рассмотрения только входных сигналов подсистем (в ориентированном графе системы учитываются только входящие ребра). Следовательно, при составлении математической модели системы целесообразно иметь матрицу, полученную из матрицы инцидентности системы A заменой всех положительных элементов нулями. В работе [6] такая матрица названа приведенной матрицей инцидентности и обозначается \tilde{A} .

Любой из элементов (подсистем) сложной стохастической непрерывной системы и система в целом в достаточно общей форме могут быть охарактеризованы каноническими векторно-матричными стохастическими уравнениями в форме Ланжевена [7].

$$\dot{X}(t) = D(t)\varphi(X, t) + W(X, t)U(t) + H(X, t)\xi(t), \quad X(t_0) = X_0, \quad (5)$$

где $X(t)$ в общем случае n -мерный случайный вектор (матрица-столбец); $D(t)$ – матрица порядка $n \times n$ детерминированных параметров с компонентами d_{kr} ; $\varphi(X, t)$ – векторная,

$$H = \begin{array}{c|ccccccccc|c} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & \\ \hline & 2 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ \hline & 1 & 2 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 2 \\ \hline & 1 & 1 & 2 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 3 \\ \hline & 1 & 0 & 1 & 2 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 4 \\ \hline & 0 & 1 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1 & 0 & 1 & 5 \\ \hline & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1 & 0 & 6 \\ \hline & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1 & 7 \\ \hline & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 2 & 1 & 8 \\ \hline & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 2 & 9 \end{array}$$

Рис. 12. Матрица соседства ребер

$W(X, t)$, $H(X, t)$ – матричные нелинейные функции; $U(t)$ – r -мерная ($r < n$) векторная функция управления; ξ – n -мерный вектор централизованного гауссового белого шума с положительно-определенной матрицей интенсивностей $G(t)$ и матрицей корреляционных функций:

$$K_\xi(t, t') = G(t)\delta(t - t'), \quad (6)$$

$\delta(t)$ – дельта функция Дирака. $X \in R^n$, $U \in R^r$, $\xi \in R^n$. R^n – n -мерное евклидово пространство.

В процессе функционирования реальной системы возможны случаи, когда связи между подсистемами и соответственно вид уравнения (6) могут изменяться под действием случайных факторов. Следовательно, в достаточно общем виде математическая модель динамической непрерывной стохастической системы с нестационарной структурной неопределенностью (случайной структурой) принимает вид [5]:

$$\dot{X}^{(s)}(t) = D(t)\varphi^{(s)}(X, t) + W^{(s)}(X, t)U(t) + H^{(s)}(X, t)\xi(t), \quad X(t_0) = X_0, \quad (7)$$

где $S(t) = \{s, t\}$ – индекс структуры (состояния) системы.

Векторно-матричное уравнение вида (7) пригодно для использования в качестве математической модели большинства существующих технических систем.

Таким образом, с учетом сделанных выше предположений для изучения структуры связей между подсистемами, а также входными и выходными контактами элементов сложной системы целесообразно использовать методы теории графов, а для описания работы подсистем – необходимо использовать компонентные дифференциальные уравнения разрывного типа в форме Ланжевена [6]. При этом ис-



Рис. 13. Структура математической модели БАК

ходной является структурная схема системы (рис. 13).

Заключение

В зависимости от задачи, поставленной исследователем, структурные схемы сложных технических систем могут иметь различный вид. Математические модели сложных технических систем, в частности, беспилотных авиационных комплексов и их составляющих представляют собой совокупность топологических и компонентных уравнений.

Топологические уравнения сложной системы, характеризующие взаимосвязи и взаимное влияние подсистем, составляются на основе использования теории множеств и теории графов. Для составления компонентных уравнений сложной системы, описывающих динамику подсистем, используется теория динамических систем случайно изменяющейся структуры, наиболее полно отражающая случайный скачкообразный характер воздействий, которым подвержена система.

Литература

1. Беспилотные летательные аппараты / под ред. Новичкова. – М.: Информационное агентство АРМС-ТАСС, 2009. – 436 с.
2. Дистель Р. Теория графов Пер. с англ. / Р. Дистель. – Новосибирск: Издательство института математики, 2002. – 336 с.
3. Вавилов А. А. Имитационное моделирование производственных систем / А. А. Вавилов. – М.: Машиностроение, 1983. – 416 с.
4. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 400 с.
5. Казаков И. Е. Анализ систем случайной структуры / И. Е. Казаков, В. М. Артемьев, В. А. Бухалев. – М.: Наука, 1993. – 270 с.
6. Лобатый А. А. Топология мультиструктурных технических систем / А. А. Лобатый. – Минск: Военная академия Республики Беларусь, 2000. – 162 с.
7. Пугачев В. С. Теория стохастических систем / В. С. Пугачев, И. Н. Сеницын. – М.: Логос, 2004. – 1000 с.

УДК 808.2:159.937

М. А. ЗИЛЬБЕРГЛЕЙТ, А. С. РЫЖАНКОВА, Белорусский государственный технологический университет

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ КЛАССИФИКАЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТЕКСТОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

В статье описан анализ устойчивости классификационных функций при обработке текстовой информации на основе применения различных методов преобразования данных. В силу того, что учебный текст в данном исследовании рассмотрен как формально-логическое образование, в качестве основных характеристик определены 14 статистических параметров, составляющих факторное пространство объектов исследования. Анализ устойчивости классифицирующих правил проведен на основе анализа рассчитанных для каждого из методов преобразования коэффициентов вариации.

In article is described the analysis of stability of classification functions when processing text information on the basis of application of various methods of transformation of data. That the educational text in this research is considered as formal and logical education, as its main characteristics 14 statistical parameters making factorial space of objects of research are determined. The analysis of stability of the classifying rules is carried out on the basis of the analysis calculated for each of methods of transformation of coefficients of a variation

В настоящее время при обработке текстовой информации широкое распространение получили методы, в основе анализа которых лежит термин, определяемый в англоязычной литературе как *readability* – читабельность, либо удобочитаемость. Существует достаточное количество формул читабельности, среди которых наибольшее распространение получили формулы: Флеша; Флеша-Кинкейда; Ганнинга; Дейла-Чолл; Пауэрса-Самнера-Кера; FORCAST; Спеша; Индекс Колемана-Лиау; Индекс SMOG; Автоматический индекс читабельности; формула письма, – а также два графических метода: график Фрая и график Рэйгора [1]. Стоит отметить, что часть из них позволяет установить возрастные планки для успешного освоения текстовой информации, другая часть оценивает текст с позиций его сложности и доступности. В русскоязычной литературе число работ, посвященных рассмотрению данного понятия чрезвычайно невелико. Среди них наибольшее распространение получили исследования [2–10] и др. Однако, в указанных работах оценка информационных характеристик текста с позиций *readability*, основанная на использовании методов распознавания образов, представлена на недостаточном уровне.

Чаще всего результаты анализа по распознаванию образов представляют в виде классификационных функций, позволяющих проводить разделение новых объектов по сформулированным решающим правилам. До настоящего времени мы не встречали работ, в которых бы были рассмотрены вопросы устойчивости таких систем к различным помехам и ошибкам, связанным с использованием эмпирических данных при обработке текстовой информации. Известно, что при работе на неполных выборках существует риск получения неустойчивых результатов [11]. Сказанное выше демонстрируется на рис. 1.

В настоящей работе для поиска устойчивого решения задачи исследования был использован ряд выборок, характеризующихся набором из 14 статистических параметров: N_1 – средняя длина слов в слогах; N_2 – средняя длина слов в буквах; N_3 – средняя длина слов по Деверу; N_4 – средняя длина слов в 3 слога и более; N_5 – средняя длина слов в 4 слога и более; N_6 – средняя длина слов в 5 слогов и более; N_7 – средняя длина слов в 6 слогов и более; N_8 – средняя длина слов в 7 слогов и более; N_9 – процент односложных слов; N_{10} – средняя длина предложения в словах; N_{11} – средняя длина предложения в слогах; N_{12} – процент чисел от общего количества слов; N_{13} – от-

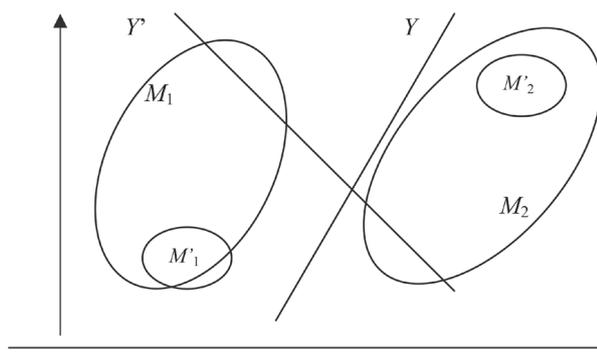


Рис. 1. Ошибки при работе на неполных выборках: M_1, M_2 – полные выборки, M'_1, M'_2 – частные выборки, Y – решающее правило на полную выборку, Y' – решающее правило на частную выборку

ношение показателя «Средняя длина слов в 3 слога и более» к показателю «Средняя длина слов в 6 слогов и более»; N_{14} – отношение показателя «Средняя длина слов в 4 слога и более» к показателю «Средняя длина слов в 6 слогов и более».

Указанные параметры описывают информационную структуру учебных изданий по специальности «Издательское дело» с позиций формально-логического подхода. В результате выполнения операций по снижению размерности факторного пространства методами корреляционных плеяд, главных компонент, кратчайшего незамкнутого пути, факторного и кластерного анализов были сформированы три класса регрессоров текстовых фрагментов, описывающих информационную структуру учебных изданий: 1 класс характеризуют факторы, описывающие среднюю длину предложения; 2 класс – факторы, описывающие дифференциальную структуру текста; 3 класс – факторы, описывающие среднюю длину слов в различных единицах измерения.

Для определения сложности каждого из текстовых компонентов был проведен эксперимент, заключающийся в реализации опроса по методу балльных оценок, методике дополнений и методу парных сравнений (735 респондентов) [12]. Полученные оценки позволили определить категории качества текста для каждого из методов опроса, а также сформировать обучающие выборки, на основе использования которых можно установить точность классификации объектов по анализу их статистической структуры.

В результате было установлено, что точность классификации объектов с использованием обучающей выборки достигает высоких результатов при анализе данных методом дискриминантного анализа (97,03% – для метода

балльных оценок (МБО), 97,03% – для метода дополнений (МД), 98,02% – для метода парных сравнений (МПС)).

На данном этапе исследование можно считать завершенным, однако, возникает вопрос, насколько полученные результаты устойчивы к помехам, возникающим при замене объектов либо изменении статистических параметров текста. Известно, что для повышения устойчивости решений применяют ряд методов, изменяющих чувствительность модели к исходным данным. К ним относятся преобразования, основанные на использовании: степенной, логарифмической, квадратичной функций; трансформация по методу Бокса-Кокса и др.

Понятие устойчивости в литературе по прикладной информатике достаточно широко варьируется. Так известны различные меры устойчивости, предложенные Тьюки [14], Ляпуновым [15], Тихоновым [16] и Тагучи [13]. В настоящей работе в качестве меры устойчивости нами был принят коэффициент вариации [13], рассчитанный для каждого из методов преобразования как мера относительного разброса случайной величины, которая характеризует качество через коэффициент вариации.

При преобразовании данных методом линейного дискриминантного анализа были получены следующие результаты. Точность классификации объектов первой выборки для МБО – 84%, МД – 86%, МПС – 80%, объектов второй выборки: МБО – 86,27%, МД – 82,35%, МПС – 82,35%, объектов третьей выборки: МБО – 76,24%, МД – 83,17%, МПС – 81,19%. Статистические показатели: среднее значение – 82,17 (МБО), 83,84 (МД), 81,18 (МПС); дисперсия – 27,66 (МБО), 3,67 (МД), 1,38 (МПС).

Одним из способов преобразования был перевод значений статистических параметров

текстов в порядковую шкалу. Для этого для каждого из факторов были определены минимальные и максимальные значения и выделены границы 10 интервалов. Результаты такого преобразования: точность классификации объектов первой выборки для МБО – 80%, МД – 80,00%, МПС – 78,00%, объектов второй выборки: МБО – 72,55%, МД – 80,39%, МПС – 84,31%, объектов третьей выборки: МБО – 72,28%, МД – 89,11%, МПС – 79,21%. Статистические показатели: среднее значение – 74,94(МБО), 83,17(МД), 80,51(МПС); дисперсия – 19,20(МБО), 26,53(МД), 11,22(МПС).

Был применен метод преобразования, основанный на вычислении среднего значения для каждого из выделенных ранее интервалов. Результаты преобразования: точность классификации объектов первой выборки для МБО – 84,00%, МД – 94,00%, МПС – 80,00%, объектов второй выборки: МБО – 78,43%, МД – 90,20%, МПС – 84,31%, объектов третьей выборки: МБО – 72,28%, МД – 89,11%, МПС – 79,21%. Статистические показатели: среднее значение – 78,24 (МБО), 91,10 (МД), 81,17 (МПС); дисперсия – 34,37 (МБО), 6,59 (МД), 7,54 (МПС).

Для преобразования данных было применено преобразование, основанное на использовании логарифмической функции. Результаты: точность классификации объектов первой выборки для МБО – 86,00%, МД – 92%, МПС – 84%, объектов второй выборки: МБО – 84,31%, МД – 88,24%, МПС – 84,31%, объектов третьей выборки: МБО – 78,22%, МД – 85,15%, МПС – 80,20%. Статистические показатели: среднее значение – 82,84 (МБО), 88,46 (МД), 82,84 (МПС); дисперсия – 16,75 (МБО), 11,77 (МД), 5,24 (МПС).

Преобразование данных методом извлечения корня квадратного показало следующие результаты: точность классификации объектов первой выборки для МБО – 90%, МД – 90%, МПС – 88%, второй выборки: МБО – 86,27%, МД – 86,27%, МПС – 82,35%, третьей выборки:

МБО – 76,24%, МД – 83,17%, МПС – 79,21%. Статистические показатели: среднее значение – 84,17 (МБО), 86,48 (МД), 83,19 (МПС); дисперсия – 50,64 (МБО), 11,70 (МД), 19,84 (МПС).

Одним из наиболее распространенных способов преобразования данных является трансформация методом Бокса-Кокса. Результаты такого преобразования: точность классификации объектов первой выборки для МБО – 88%, МД – 94%, МПС – 90%, объектов второй выборки: МБО – 88,24%, МД – 88,24%, МПС – 84,31%, объектов третьей выборки: МБО – 78,22%, МД – 84,16%, МПС – 83,17%. Статистические показатели: среднее значение – 84,82 (МБО), 88,80 (МД), 85,83 (МПС); дисперсия – 32,68 (МБО), 24,44 (МД), 13,39 (МПС).

В результате выполнения преобразований на основе применения степенной функции установлено: точность классификации объектов первой выборки для МБО – 92%, МД – 92%, МПС – 80%, объектов второй выборки: МБО – 90,2%, МД – 84,31%, МПС – 80%, объектов третьей выборки: МБО – 78,22%, МД – 86,14%, МПС – 78,22%. Статистические показатели: среднее значение – 86,81 (МБО), 87,48 (МД), 79,54 (МПС); дисперсия – 56,11 (МБО), 16,14 (МД), 1,34 (МПС).

В результате использования квадратичной функции для трансформации данных были получены результаты: точность классификации объектов первой выборки для МБО – 82%, МД – 88%, МПС – 88%, второй выборки: МБО – 88,24%, МД – 88,24%, МПС – 80,39%, третьей выборки: МБО – 77,23%, МД – 85,15%, МПС – 83,17%. Статистические показатели: среднее значение – 82,49 (МБО), 87,13 (МД), 83,85 (МПС); дисперсия – 30,49 (МБО), 2,95 (МД), 14,83 (МПС).

В табл. 1 приведены результаты распознавания объектов. В табл. 2 – статистические показатели проведенного анализа.

В табл. 3 представлены рассчитанные значения коэффициентов вариации.

Таблица 1. Результаты распознавания объектов

Наименование	Точность классификации, %								
	2-й порядок			3-й порядок			4-й порядок		
	МБО	МД	МПС	МБО	МД	МПС	МБО	МД	МПС
Объекты первой выборки	98	96	92	100	100	98	82	86	78
Объекты второй выборки	90,2	96,08	92,16	98,04	100	98,04	45,1	82,35	21,57
Объекты третьей выборки	78,22	86,14	87,13	83,17	90,1	91,09	87,13	95,05	94,06

Таблица 2. Статистические показатели анализа

	2-й порядок			3-й порядок			4-й порядок		
	МБО	МД	МПС	МБО	МД	МПС	МБО	МД	МПС
Среднее значение	88,81	92,74	90,43	93,74	96,7	95,71	71,41	87,80	64,54
Дисперсия	99,27	32,67	8,17	84,7	32,67	16,01	525,74	42,75	1449,51
Среднеквадратичное отклонение	9,96	5,72	2,86	9,2	5,72	4,00	22,93	6,54	38,07

Таблица 3. Значения коэффициентов вариации

Метод преобразования	МБО, %	МД, %	МПС, %
Линейный дискриминантный анализ	6,40	2,28	1,45
Перевод в порядковую шкалу	5,85	6,19	4,16
Среднее значение интервала	7,49	2,82	3,38
Логарифмическая функции	4,94	3,88	2,76
Извлечение корня квадратного	8,45	3,95	5,35
Метод Бокса-Кокса	6,74	5,57	4,26
Использование степенной функции	8,63	4,59	1,45
Использование квадратичной функции	6,69	1,97	4,59
Дискриминантный анализ 2-го порядка	11,22	6,16	3,16
Дискриминантный анализ 3-го порядка	9,82	5,91	4,18
Дискриминантный анализ 4-го порядка	32,11	7,45	58,99

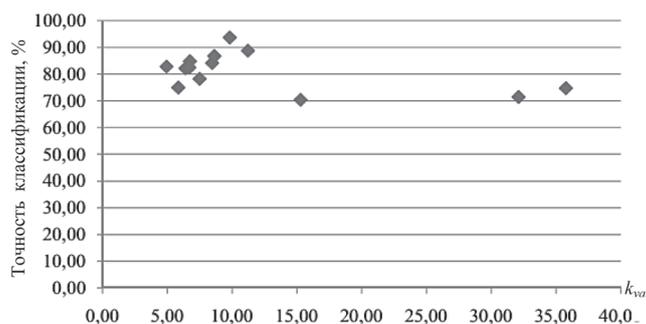


Рис. 2. Графические результаты анализа для метода балльных оценок

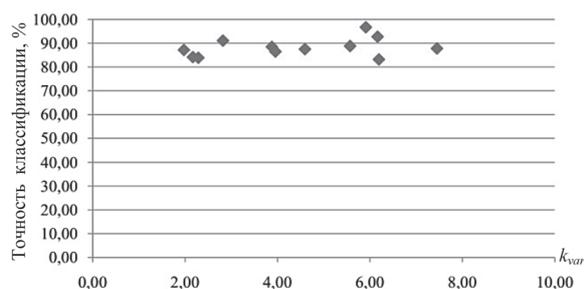


Рис. 3. Графические результаты анализа для методики дополнений

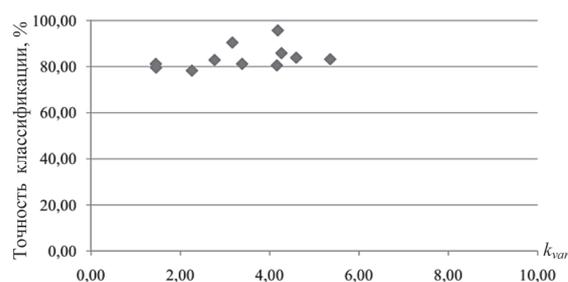


Рис. 4. Графические результаты анализа для метода парных сравнений

Коэффициенты вариации для дискриминантного уравнения пятого порядка составляют для МБО – 35,77%, для МД – 64,28%, для МПС – 59,67%. На рис. 2, 3, 4 представлены графические результаты. Ось абсцисс содержит значения коэффициентов вариации, ось ординат – средние значения процентного соотношения совпадений расчетов с результатами экспериментальной части.

Заключение

В результате поиска устойчивого к помехам решения было определено, что задачам исследования отвечают преобразования двух типов, основанных на использовании логарифмической и степенной функций. Однако наименьшие значения коэффициентов вариации наблюдаются при использовании преобразования с помощью десятичного логарифма.

Литература

1. Readability Formulas. – Режимдоступа: <http://www.readabilityformulas.php>.
2. **Филиппова А. В.** Управление качеством учебных материалов на основе анализа трудности понимания учебных текстов / А. В. Филиппова. – Уфа. 2010.
3. **Мацковский М. С.** Проблемы читабельности печатного материала // Смысловое восприятие речевого сообщения в условиях массовой коммуникации / отв. ред. Т. М. Дридзе, А. А. Леонтьев. – М.: Наука, 1976. – С. 126–142.
4. **Добляев Л. П.** Анализ и понимание текста / Саратов. гос. ун-т им. Н. Г. Чернышевского. – Саратов: Изд-во Саратов. Ун-та, 1987. – 69 с.
5. **Вул С. М.** Статистическое исследование текстов с помощью ЭВМ и дисплея в целях установления авторства // Применение ЭВМ в судебно-экспертных исследованиях и поиске правовой информации. – М.: Наука, 1975.
6. **Микк Я. А.** Оптимизация сложности учебного текста. – М.: Просвещение, 1981. – 119 с.
7. **Вильде Л. Де.** Количественный анализ текста... // Лингвистика. Межкультурная коммуникация. – Сб. науч. тр. – Вып. 1. – Курск, 1997.
8. **Криони Н. К.** Автоматизированный анализ сложности учебного текста / Криони Н. К., Никин А. Д., Филиппова А. В. // Труды международной научно-практической конференции «Новые информационные технологии в образовании». – Екатеринбург, 2009 г.
9. **Кубрякова Е. С.** О тексте и критериях его определения // Текст. Структура и семантика. – Т. 1. – М., 2001 г. – С. 72–81.
10. **Оборнева И. В.** Автоматизированная оценка сложности учебных текстов на основе статистического анализа: автореферат диссер. на соискание учен. степ. 13.00.02 Теория и методика обучения и воспитания (информатизация образования) / И. В. Оборнева. – М.: РАН Институт содержания и методов обучения, 2006.
11. **Глаз А. Б.** Параметрическая и структурная адаптация решающих правил в задачах распознавания. – Рига: Зинатне, 1988. – 167 с.
12. Сравнительный анализ методов опроса и компьютерного анализа данных для изучения восприятия текстов студентами высших учебных заведений / А. С. Малюкевич, М. А. Зильберглейт // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – № 6 (81) Естественные науки. – ISSN 1609–9672. – Минск, 2013. – С. 134–138.
13. Управление качеством. Робастное проектирование. Метод Тагути / Леон Р., Шумейкер А., Какар Р., Кац Л., Фадке М. и др.; Пер с англ. – М.: «СЕЙФИ» 2002. – 384 с.
14. **Орлов А. И.** Прикладная статистика. – М.: Издательство «Экзамен», 2004. – 656 с.
15. **Андреев В. С.** Теория нелинейных электрических цепей: учеб. пособ. для вузов. – М.: Радио и связь, 1982. – с. 135–136.
16. **Тихонов А. Н.** Об устойчивости обратных задач // Докл. АН СССР. Нов. сер.- 1943.– Т.39, № 5.– С. 195–198.

УДК 681.3

А. А. ПРИХОЖИЙ, О. М. ФРОЛОВ, Белорусский национальный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАНИРОВЩИКОВ ЗАДАЧ В GRID

Проблема управления выполнением заданий клиентов и оптимального использования распределенных вычислительных ресурсов является одной из ключевых в grid. В статье проведено детальное исследование и сопоставление планировщиков и принципов планирования решения задач в grid как по качеству работы, так и производительности. Результаты проведенных вычислительных экспериментов выявили критические компоненты планировщиков и приоритетные подходы к планированию, которые являются перспективными и определяют пути дальнейшего развития методов оптимизации grid-систем.

The problem of execution management of client's tasks and optimal management of cluster's computing resources is one of the key problems in grid. In this paper the detailed investigation and comparison of task schedulers and task scheduling techniques has been performed with respect to the result quality and throughput. The results of conducted computing experiments have found out the critical scheduler's components and preferable scheduling approaches which are promising and indicate the ways of further development of grid optimization methods.

Введение

Grid – это согласованная, открытая и стандартизованная среда, обеспечивающая гибкое, безопасное и скоординированное разделение вычислительных ресурсов в рамках одной виртуальной организации [1]. Grid-вычисления относятся к разновидности распределенных вычислений, где виртуальный суперкомпьютер представлен кластерами разнородных компьютеров, соединенными сетью и выполняющими огромное количество заданий, поступающих от разных клиентов. Ситуация неконтролируемого разделения времени большого числа процессоров посредством «ручного» управления заданиями, когда много параллельных задач конкурируют за вычислительные ресурсы, катастрофична для общей производительности системы. В связи с этим все современные вычислительные кластеры имеют систему управления ресурсами и планирования выполнения заданий, позволяющую оптимизировать использование ресурсов и обслуживание клиентов.

Решение задач в grid

Одним из важнейших компонентов grid-системы является GRAM (Grid Resource Allocation and Management). Это набор сервисов, реализующих услуги по регистрации задач и ресурсов, формированию и обслуживанию

очереди задач и ресурсов, отправки задач на выполнение на выделенных им ресурсах, мониторингу состояния, определению моментов завершения выполнения задач. Планирование решения задач на ресурсах *grid* является самостоятельной и чрезвычайно сложной проблемой как с точки зрения структурной сложности системы, так и с точки зрения вычислительных затрат на поиск оптимального плана решения [2].

Цель планирования – обеспечить скоординированное разделение ресурсов, учитывающее интересы пользователей и владельцев ресурсов. Результатом планирования является план использования ресурсов, учитывающий требования, ассоциированные с задачами. Представляют интерес методы и алгоритмы планирования, находящие наиболее оптимальное соответствие ресурсов задачам и устанавливающие точные временные интервалы времени, на которых ресурсы доступны задачам.

Вычислительные ресурсы *grid* обычно управляются локальным менеджером, который назначает ресурсы задачам в режиме конкуренции с другими задачами, находящимися в очереди на выполнение, в расчете на общую эффективность и высокую производительность. GRAM не является планировщиком ресурсов, он реализует протокол взаимодействия

с разнообразными локальными планировщиками посредством унифицированных сообщений.

Весь функционал, предоставляемый системами управления кластерами, можно разделить на две группы. Группа команд управления ресурсами обеспечивает: постановку задач в очередь на выполнение; планирование выполнения задач; запуск задач; остановку задач. Группа команд мониторинга обеспечивает: получение актуальной информации о текущем состоянии узлов вычислительной системы; получение информации о текущем состоянии задач. Центральным компонентом системы управления кластером является планировщик. Именно он обеспечивает эффективное использование вычислительных ресурсов узлов кластера. По мере поступления задач в очередь на выполнение, каждая получает некоторый приоритет. Планировщик выбирает наиболее приоритетные задачи и, в соответствии с некоторой стратегией планирования, выбирает предпочтительные узлы, на которых задачи исполняются.

Планировщики решения задач

Компонент GRAM grid-системы конструируется не в жесткой связке с конкретным планировщиком решения задач, а в качестве интегрирующего средства, допускающего встраивание разнообразных планировщиков, таких как Condor, PBS, SGE, Fork и др. Проанализируем сильные и слабые стороны каждого из них.

Планировщик *Condor* [3] разработан университетом Висконсин, США и является специализированной системой управления загрузкой распределенных ресурсов grid для задач большой вычислительной сложности. Он использует механизм очередей задач, приоритеты задач, стратегию планирования и мониторинга задач, а также стратегию управления распределенными ресурсами. В процессе функционирования *Condor* использует различные среды, например, *Standard* и *Vanilla* для выполнения последовательных задач, *PVM* и *MPI* для выполнения параллельных задач и др. Он допускает миграцию процессов путем приостановления их выполнения на одних машинах и продолжения выполнения на других незагруженных машинах. Приоритет задачи $\pi(u, t)$,

сформированной пользователем u , меняется с течением времени t рассчитывается по формуле

$$\pi(u, t) = [\beta\pi(u, t - \delta) + (1 - \beta)\rho(u, t)]f(u, t), \quad (1)$$

где δ – интервал времени пересчета приоритетов; $\beta = 0.5^{\delta/h}$ – коэффициент скорости изменения приоритета; h – константа, заданная администратором; $\rho(u, t)$ – количество ядер используемого процессора; $f(u, t)$ – фактор поднятия приоритета пользователя u в момент времени t .

Планировщик *Sun Grid Engine (SGE)* [4] разработан Sun Microsystems (позже Oracle и Univa) с целью максимально эффективного использования ресурсов кластера компьютеров. Он выполняет прием, планирование, диспетчеризацию и управление удаленным выполнением большого числа одиночных, параллельных и взаимодействующих задач. SGE разбивает ресурсы на списки ожидания и назначает их задачам, находящимся в очереди на выполнение. Для каждого пользователя определяется квота общих доступных ресурсов. Благодаря алгоритму *backfill*, SGE ориентирован на эффективное планирование большого потока малых задач.

Планировщик *Portable Batch System (PBS)* [5] впервые разработан NASA с целью распределения вычислительных задач между доступными ресурсами кластера. Он принимает сценарий оболочки, пакетные задания и управляющие атрибуты, сохраняет и защищает задания до запуска, запускает их на выполнение и передает результаты клиенту. Планировщик *Torque* относится к семейству PBS и является менеджером ресурсов Linux-кластера, использующим средства управления параллельными процессами, такие как MPI. Он обеспечивает запуск процессов, передачу данных, сборку мусора, создание интерактивных сессий, разделение процессорного времени между задачами и др. PBS включает четыре главных компонента: команды, сервер заданий, планировщик заданий и исполнитель заданий. Современная версия *Torque* использует развитый планировщик *Maui*, который может выполнять большое количество задач и выравнивать загрузку узлов.

Планировщик *Fork* [6] запускает разветвляющиеся задачи на выполнение и отслеживает изменение статуса выполняемых задач

посредством генераторов событий. Стартер разветвляющихся задач создается для каждой родительской задачи и завершает выполнение при завершении каждой из подчиненных задач. Планировщик *Fork* не является кластерным и не реализует мониторинг выполняемых задач. Планировщик реализует стратегию раньше пришел – раньше обслуживается (First Come First Served – FCFS).

Проблема малых заданий, ассоциирующаяся с планированием многопроцессорных заданий, является наиболее трудной для планировщика. Поскольку много малых заданий фрагментируют ресурсы, приоритетное планирование не способно обеспечить запуск заданий, требующих объемных ресурсов. Алгоритмы обратного заполнения *backfill* и справедливого распределения ресурсов *fairshare* [7] способны накапливать необходимые ресурсы и представляются лучшими известными алгоритмами планирования многопроцессорных заданий в grid.

Организация экспериментов с планировщиками

Эксперименты проводились на тестовом вычислительном кластере, архитектура которого показана на рис. 1. Развертывание кластера выполнено посредством веб-сервиса Amazon Cloud и инструментария Globus Toolkit. Компоненты службы безопасности Globus-gsi, при-

ема задач и управления ресурсами Globus-Gram и хранения/передачи файлов Globus-gridftp назначены на отдельные узлы кластера, аппаратное обеспечение каждого из которых включает процессор Intel Xeon E54302.66 GHz и оперативную память емкостью 600 МБ с доступом к сети со скоростью 23.2 МБ/с. На узле Globus-Gram установлена мастер-часть планировщика, отвечающая за прием и рассылку задач на свободные вычислительные узлы, а также адаптер между Globus-Gram и планировщиком. Выполнение планируемых задач осуществлялось на двух вычислительных узлах, обладающих 4-х ядерными процессорами Xeon E5-2680 v2 (Ivy Bridge) Processors 2.8 GHz и оперативной памятью емкостью 7.5 ГБ с доступом к сети со скоростью 23.2 МБ/с. На этих узлах установлена часть планировщика, принимающая задачи от Gram и запускающая их на выполнение.

Клиент в течение часа случайным образом генерирует задачи на вычисление числал с различной точностью. Число $n(\pi)$ значащих цифр решающим образом влияет на потребляемые задачей вычислительные ресурсы: объем памяти и интервал процессорного времени. Число $n(\pi)$ выбирается из конечного множества по равномерному закону распределения вероятностей. В начале теста задачи генерируются непрерывно до заполнения очереди из 50 задач. Далее клиент ожидает результаты выпол-

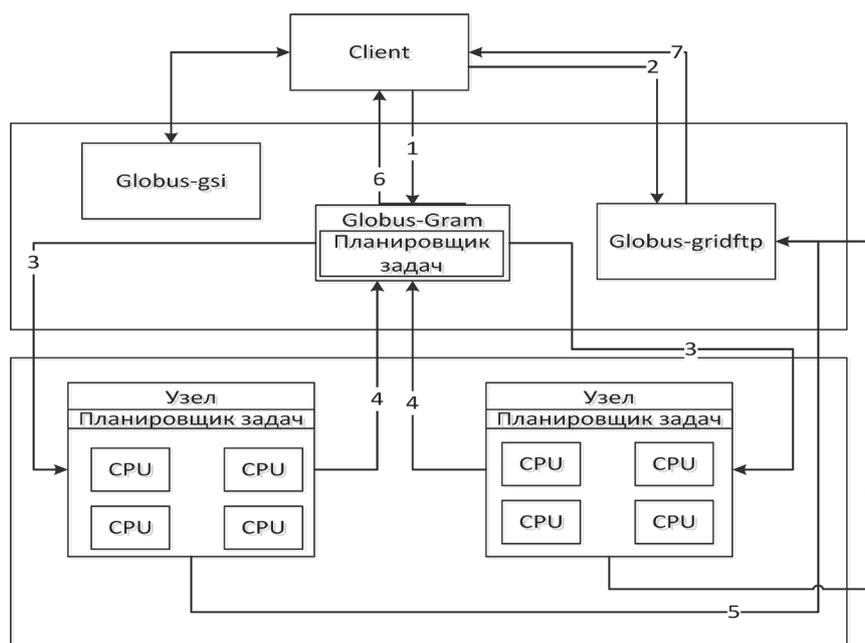


Рис 1. Архитектура вычислительного кластера

нения задач. Получение результата от очередной выполненной задачи влечет генерацию и постановку в очередь следующей задачи. По истечении часа клиент ждет завершения всех ранее сгенерированных задач.

В каждой задаче число π вычисляется алгоритмом Чудновского [8], в основе которого лежит уравнение

$$\frac{1}{\pi} = 12 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k (6k)! (545140134k + 13591409)}{(3k)! (k!)^3 640320^{3k + \frac{3}{2}}}, \quad (3)$$

где k – член ряда. В зависимости от $n(\pi)$ задачи имеют различные требования к ресурсам памяти и процессорного времени (табл. 1). При увеличении числа значащих цифр в π с 10000 до 30000000 требуемый объем памяти возрастает в 420 раз, а требуемое процессорное время – в 3504 раз на одном процессоре.

Таблица 1. Объем памяти и процессорного времени, требуемый алгоритмом Чудновского в зависимости от числа значащих цифр в числе π

Количество цифр $n(\pi)$	Требуемый объем памяти (МВ)	Требуемое время на одном процессоре (с)
10000	1	0.007
100000	10	0.041
1000000	80	0.511
10000000	136	7.121
20000000	291	14.967
30000000	420	24.530

После генерации каждая задача поступает в компонент Globus-Gram. Над ней выполняются следующие операции: 1) постановка задачи в очередь на планирование; 2) запись тестовых данных на узел Globus-gridftp; 3) планирование выполнения задачи; 4) запуск зада-

чи на узле выполнения; 5) формирование результата выполнения; 6) запись результата на узел Globus-gridftp; 7) получение клиентом информации о завершении задачи; 8) передача клиенту результирующих данных с Globus-gridftp. Описанный сценарий был последовательно реализован для планировщиков Condor, PBS, SGE и Fork.

Результаты вычислительных экспериментов

Табл. 2 описывает задачи, сгенерированные и выполненные в экспериментах с каждым из планировщиков. Например, в эксперименте с планировщиком SEG сгенерировано 262 задачи с $n(\pi) = 10000$, из которых 134 задачи выполнены на узле 1 и 128 задач выполнены на узле 2. Общее число сгенерированных задач является случайным, но зависит от производительности и качества работы планировщика. Предпоследняя строка табл. 2 описывает суммарное время, прогнозируемое в соответствии с табл. 1 на выполнение всех задач с одинаковым $n(\pi)$ на одном процессоре. Так, для задач с $n(\pi) = 10000$ прогнозируемое время равно 6.8 с, а для задач с $n(\pi) = 30000000$ время равно 24064 с. Соответственно, доля первых задач в общем прогнозируемом времени составляет только 0.015%, а доля вторых задач – 51.59% (последняя строка табл. 2). Видим, что трудоемкость задач варьируется в широком диапазоне, что создает среду исследования планировщиков в ситуациях с большой фрагментацией ресурсов. Прогнозируемое время для каждого из планировщиков на каждом из узлов 1 и 2 описывается предпоследним столбцом табл. 2. Максимальная разница прогнозируемой загрузки узлов составила

Таблица 2. Задачи, сгенерированные клиентом для каждого планировщика и каждого узла

Планировщик	Узел	Количество цифр $n(\pi)$ в числе π						Время (с)	Время (с)
		10000	100000	1000000	10000000	20000000	30000000		
Condor	1	133	120	119	128	110	113	5396	10843
	2	118	132	110	122	105	120	5446	
PBS	1	106	110	115	127	124	101	5302	11374
	2	123	117	115	135	111	138	6072	
SEG	1	134	161	141	123	161	141	6824	13433
	2	128	138	130	136	136	144	6609	
Fork	1	129	126	129	126	122	103	5322	10994
	2	97	123	91	116	122	121	5672	
Суммарное время (с)		6.8	42	485	7213	14832	24064	46644	46644
Доля во времени (%)		0.015	0.09	1.04	15.47	31.80	51.59	100	100

Т а б л и ц а 3. Производительность планировщиков

Планировщик	Время выполнения всех задач (с)	Ускорение (раз)	Количество выполненных задач			Среднее потребление планировщиком времени процессора (%)		
			узел 1	узел 2	всего	узел 1	узел 2	мастер узел
Condor	3867	2.80	723	707	1430	2.06	2.05	3.6
PBS	3910	2.91	683	739	1422	3.96	4.06	2.6
SGE	3825	3.51	861	812	1673	1,45	1.43	4.5
Fork	4107	2.68	735	670	1405	2.4	2.4	–

12.7% для планировщика PBS, средняя разница по всем планировщикам – 5.8%. В разнице загрузки узлов проявляется качество планирования многопоточных задач.

Важнейшие параметры, характеризующие производительность планировщиков, приведены в табл. 3. Качество работы планировщика оценивается тремя параметрами: общим временем выполнения всех задач, ускорением параллельного выполнения задач по сравнению с последовательным выполнением, количеством спланированных и выполненных задач за все время работы планировщика. Общее время планирования и выполнения задач складывается из двух частей: времени генерации и приема задач на выполнение, равного 3600 с, и времени завершения задач, оставшихся по истечении 1 ч. Так для планировщиков Condor, PBS, SGE и Fork время завершения составило 267, 310, 225 и 507 с соответственно. Ускорение параллельного выполнения многопоточных задач по сравнению с последовательным выполнением эквивалентных однопоточных задач составило 3.51, 2.91, 2.8 и 2.68 для планировщиков SGE, PBS, Condor и Fork соответственно. Наиболее быстрый планировщик SGE обеспечил выполнение максимального числа задач 1673. Планировщики Condor, PBS и Fork обеспечили выполнение 1430, 1422 и 1405 задач соответственно, что на 14.5%, 15.0%, и 16.0% меньше по сравнению с SGE.

Быстродействие планировщика оценивается долей процессорного времени, потребляемого в процессе функционирования. Согласно табл. 3, столбцы 7 и 8, потребление планировщиками времени на вычислительных узлах 1 и 2 составило: SGE – 1.44%, Fork – 2.40%, Condor – 3.69% и PBS – 4.01%. Потребление времени на мастер-узле составило: Fork – 0%, PBS – 2.6%, Condor – 4.1% и SGE – 4.5%. Более детальный анализ процессорного времени, потребляемого планировщиками, дают графики, изображенные на рис. 2.

Вид графиков потребления процессорного времени кластерным планировщиком Condor определяется используемой стратегией планирования – многоуровневой очередью с приоритетами, рассчитываемыми динамически по характеристикам пользовательских задач. Пики потребления процессорного времени периодически повторяются каждые 10 с и совпадают с моментами пересчета приоритетов задач. Стадия инициализации внутренних подсистем Condor длительностью около 4 с определяет пик потребляемого процессорного времени до 25% на вычислительном узле и 55% на мастер-узле.

Вид графика потребления времени кластерным планировщиком PBS определяется стратегией Backfill, стремящейся к справедливому распределению ресурсов grid. Высокоприоритетным многопоточным задачам предоставляется возможность параллельного выполнения сразу на нескольких процессорах. Планировщик способен накапливать и резервировать для трудоемких задач необходимый объем фрагментированных ресурсов. Стадия инициализации внутренних подсистем продолжается 12 с с потреблением около 15% процессорного времени на вычислительном узле и 40% времени на мастер-узле.

Кластерный планировщик SGE дает лучшее качество результатов планирования, но потребляемое им процессорное время превышает время, потребляемое планировщиком Fork. Не смотря на то, что SGE используют ту же стратегию планирования, что и PBS, существенное различие в объеме потребляемого времени (1.44% против 4.01%) свидетельствует о разных механизмах обработки очереди задач. Стадия инициализации внутренних подсистем SGE-Gramсамая длинная (16 с). Собственное потребление вычислительных ресурсов планировщиком SGE сокращается при отключении мониторинга запущенных на выполнение задач.

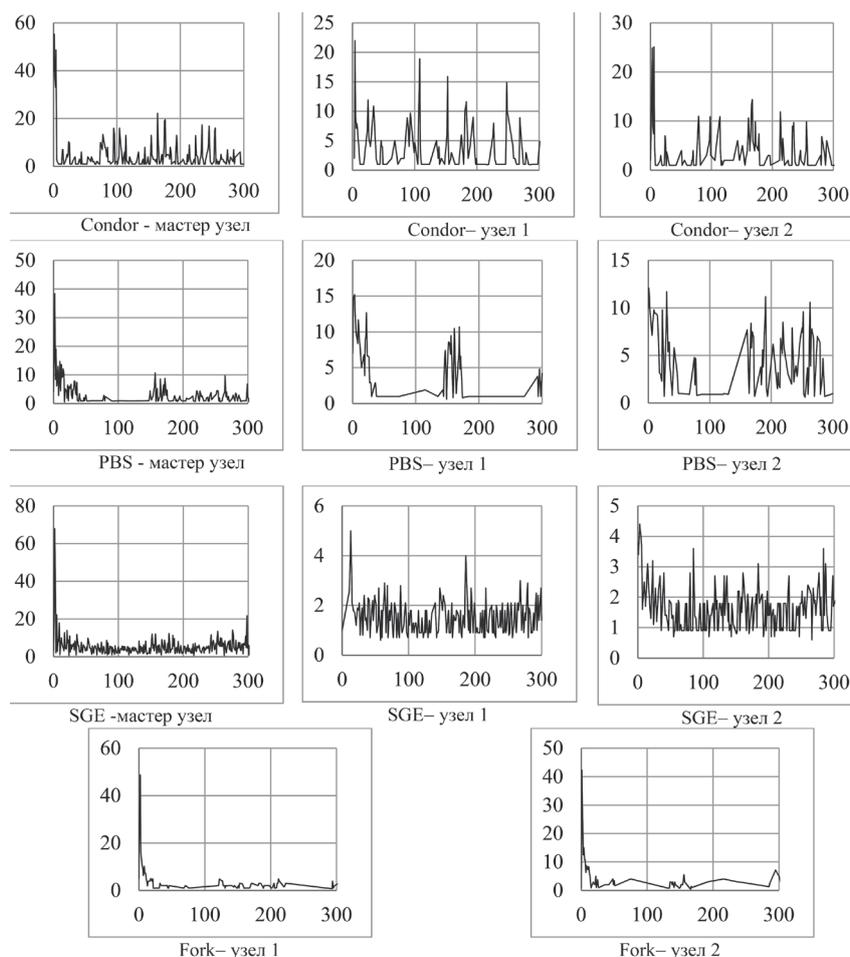


Рис. 2. Потребление планировщиками процессорного времени в процентах первые 300 с

Анализ графиков загрузки вычислительных узлов планировщиком Fork показывает, что существует высокий пик (до 50%) периода инициализации. Достаточно низкое потребление времени в стационарном режиме объясняется тем, что планировщик не является кластерным, не присутствует на мастер-узле, реализует достаточно простую стратегию планирования и не осуществляет мониторинг задач в период выполнения.

Среднее, средневзвешенное и пиковое потребление процессорного времени процессами сервиса Gram и процессами каждого из четырех планировщиков приведено в табл. 4. Средневзвешенное потребление оценивается лишь на интервалах времени, на которых наблюдается отличная от нуля активность процесса.

Для поддержки функционирования всех планировщиков используются два процесса службы Gram: процесс `globus-gatekeeper` авторизации и поддержки работы пользователя;

процесс `globus-job-manager` управления планированием, выполнением и отслеживанием состояния задач. Процесс `globus-scheduler` обработки событий относится только к планировщикам PBS и SGE, использующим SEG-адаптер (Scheduler Event Generator) для Gram. Активность процессов убывает в порядке `globus-job-manager`, `globus-gatekeeper`, `globus-scheduler`. Высокое потребление времени этими процессами ставит задачу оптимизации работы SEG-адаптера, обеспечивающего взаимодействие Gram и планировщика.

В планировщике Condor наибольшим потреблением среднего, средневзвешенного и пикового процессорного времени обладают процесс `condor_procd` отслеживания и управления выполнением задачи, процесс `condor_schedd` планирования задач из очереди ожидания и процесс `condor_startd` взаимодействия между вычислительным узлом и мастер-узлом Condor. Средневзвешенное и пиковое потребление времени выстраивает оставшиеся процессы

Таблица 4. Потребление времени процессами Gram и процессами планировщиков

Процессы планировщиков	Среднее потребление (%)		Средневзвешенное потребление (%)		Пиковое потребление (%)	
Condor						
	мастер узел		мастер узел		мастер узел	
globus-job-manager	1.3677		9.3365		37.6	
condor_schedd	0.9427		3.1493		14.5	
condor_startd	0.8413		2.1568		6	
condor_shadow	0.4513		2.0718		6.9	
condor_collector	0.2365		1.1236		3	
condor_negotiator	0.1647		1.4106		3	
condor_starter	0.0590		1.8322		5	
globus-gatekeeper	0.0416		1.0807		2	
condor_master	0.0037		1.2000		2	
	узел1	узел2	узел1	узел2	узел1	Узел2
condor_procd	1.5911	1.6815	4.5907	4.8567	12.9	15.6
condor_schedd	1.0846	1.0803	2.6184	2.7284	12.4	14.5
condor_startd	0.9697	0.9623	1.8358	1.8880	5.9	5
condor_master	0.0042	0.0043	1.0000	1.0000	1	1
PBS						
	мастер узел		мастер узел		мастер узел	
globus-job-manager	1.4458		3.5556		28.6	
pbs_server	0.6261		2.3424		35.3	
pbs_schedd	0.2607		1.0280		2	
globus-gatekeeper	0.2388		3.7308		15.2	
globus-scheduler	0.0535		3.4785		13.8	
	узел1	узел2	узел1	узел2	узел1	узел2
pbs_mom	3.7224	3.8253	5.9256	5.7199	14	13.5
pbs_shed	0.2497	0.2375	0.9611	0.9102	1.9	1.9
SGE						
	мастер узел		мастер узел		мастер узел	
globus-job-manager	2.4126		4.6111		57.6	
sge_qmaster	1.8355		4.7607		68.4	
globus-gatekeeper	0.1562		2.9858		10.6	
globus-scheduler	0.0602		7.7013		31	
sge_shepherd	0.0271		0.9874		2.7	
	узел1	узел2	узел1	узел2	узел1	узел2
sge_execd	1.4588	1.4335	5.7284	3.3169	20.2	20.3
Fork						
	узел1	узел2	узел1	узел2	узел1	узел2
globus-job-manager	2.42	2.41	3.77	2.05	48.9	50.3
globus-gatekeeper	0.07	0.08	0.97	0.96	1	1

в следующем порядке: condor_shadow – процесс сопровождения выполняемой задачи; condor_collector – процесс сбора данных с других служебных процессов; condor_negotiator – процесс сопоставления задач с доступными ресурсами; condor_starter – процесс обработки всех запросов, поступающих от выполняемой задачи; condor_master – ведущий процесс планировщика.

В планировщике PBS наибольшим потреблением среднего, средневзвешенного и пико-

вого процессорного времени обладает процесс pbs_mom запуска мини сервера для выполнения групп задач. Процесс pbs_server реализации сервера PBS имеет большее средневзвешенное и пиковое потребление по сравнению с процессом pbs_sched планирования задач.

В планировщике SGE существенно наибольшим потреблением среднего, средневзвешенного и пикового процессорного времени обладают процессы sge_qmaster службы управления и sge_execd агента выполнения сплани-

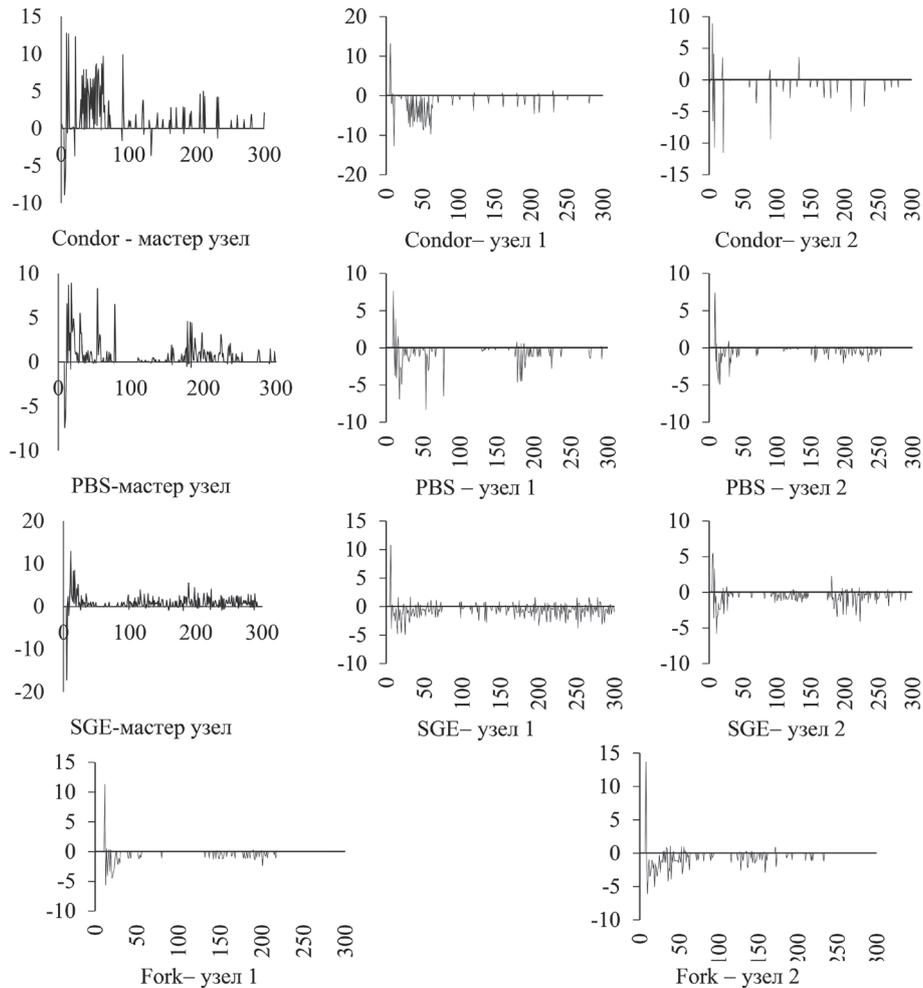


Рис. 3. Графики входящего и исходящего сетевого трафика

рованных задач. Процесс `sge_shepherd` агента контроля состояния выполняемых задач имеет значительно меньшее потребление.

Планировщик Fork реализуется только процессами `globus-gatekeeper` и `globus-job-manager` службы Gram, причем пиковое потребление времени процессом `globus-job-manager` в Fork значительно превосходит его же потребление в Condor и PBS.

Важнейшим параметром, характеризующим качество работы каждого из планировщиков, является нагрузка на сеть (рис. 3), измеряемая входящим (положительная область оси ординат) и исходящим (отрицательная область оси ординат) трафиками (время указано в секундах). Планировщик Fork, не являющийся кластерным, обеспечил наименьший средний трафик по двум вычислительным узлам (входящий – 2.91 KB/s, исходящий – 3.21KB/s). Планировщик PBS сгенерировал наибольший трафик (вычислительный узел: входящий –

26.32 KB/s, исходящий –26.52 KB/s; мастер узел: входящий – 53.33 KB/s, исходящий – 53.33 KB/s). Если от входящего/исходящего на мастер-узел трафика отнять трафик на вычислительные узлы, то получим сетевую активность между мастер-узлом и клиентом. Трафик между клиентом и мастер-узлом у PBS составил: входящий – 0.29 KB/s, исходящий – 0.68 KB/s. Планировщик Condor сгенерировал средний трафик (вычислительный узел: входящий – 14.04 KB/s, исходящий – 14.26 KB/s; мастер-узел: входящий – 28.20 KB/s, исходящий – 27.20 KB/s). Трафик между клиентом и мастер-узлом у Condor составил: входящий – 0.31 KB/s, исходящий – 0.89 KB/s. Трафик, сгенерированный планировщиком SGE, хотя и превышает трафик, сгенерированный планировщиком Fork, однако с учетом богатой функциональности является достаточно низким (вычислительный узел: входящий – 6.60 KB/s, исходящий – 6.85 KB/s; мастер-узел: входя-

щий – 14.47 KB/s, исходящий – 13.95 KB/s). Трафик между клиентом и мастер-узлом SGE составил: входящий – 0.25 KB/s, исходящий – 1.28 KB/s. По возрастанию разности исходящего и входящего трафиков планировщики выстроились в следующем порядке: PBS – 0.192 KB/s, Condor – 0.213 KB/s, SGE – 0.251 KB/s, Fork – 0.3 KB/s. Анализируя вариации входящего трафика между клиентом и мастер-узлом для разных планировщиков заметим, что они незначительны и в значительной степени обусловлены количеством задач, отправленных на выполнение. Вариации в исходящем трафике сильно зависят от планировщика и связаны с объемом информации о процессе выполнения задач, передаваемой клиенту.

Заключение

Проведено исследование качества работы и производительности планировщиков выполнения задач с целью выявления критических компонентов и путей оптимизации grid-систем. Достоверность полученных результатов обусловлена одинаковыми условиями генерации и выполнения тестовых задач, а наблюдаемые различия в параметрах показывают особенности организации, алгоритмов работы и внутренней реализации планировщиков. Исследуемым и объектами явились менеджер ресурсов grid-системы, планировщик

задач и адаптер между менеджером ресурсов и планировщиком задач. Исследована внутренняя структура каждого из четырех планировщиков и выявлены компоненты, потребляющие наибольший объем процессорного времени и являющиеся перспективными для оптимизации и улучшения параметров планировщиков.

Наилучшее качество результатов планирования дал планировщик SGE. Он обеспечил выполнение наибольшего числа задач за отведенный интервал времени, наилучшим образом справился с планированием параллельных многопоточных задач и дал коэффициент ускорения 3.51 для четырех потоков, выполняемых на четырех ядрах. Планировщик SGE ставит задачи в очередь и выполняет их планирование асинхронно, в силу этого график выполнения задач в отличие от планировщика PBS выглядит сильно неравномерным. Анализ сетевой активности при планировании и выполнении задач показывает схожее потребление сетевых ресурсов планировщиками SGE и PBS. Сказанное относится также к потреблению процессорного времени, поскольку оба планировщика реализуют один алгоритм планирования Backfill. В отличие от них Condor реализует алгоритм управления очередью по приоритетам задач, что увеличивает его сетевую активность, но уменьшает потребление процессорного времени.

Литература

1. **Foster I.** Computational Grids / I. Foster, C. Kesselman // Chapter in book «The Grid: Blueprint for a New Computing Infrastructure», Morgan-Kaufman, 1999.
2. **Xhafa F. and Abraham A.** Meta-heuristics for Grid Scheduling Problems // Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, SCI146, 2008. – P. 1–37.
3. **Thain D.** Distributed Computing in Practice: The Condor Experience / D. Thain, T. Tannenbaum and M. Livny // Concurrency and Computation: Practice and Experience, Vol. 17, No. 2–4, 2005. – P. 323–356.
4. **Gentzsch W.** Sun Grid Engine: Towards Creating a Compute Power Grid / W. Gentzsch // CCGRID, IEEE Computer Society, 2001. – P. 35–39.
5. **Henderson R.** Portable batch system: External reference specification / R. Henderson and D. Tweten // Technical report, NASA, Ames Research Center, 1996.
6. **Towsley D.** Analysis of Fork-Join Program Response Times on Multiprocessors / D. Towsley, C. G. Rommel, J. A. Stankovich // IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems, Vol. 1, No.3, 1990. – P. 286–303.
7. **Gibbons R.** A historical application prober for use by parallel schedulers. In Job Scheduling Strategies for Parallel Processing, D. G. Feitelson and L. Rudolph (eds.), pp. 58–77, Springer Verlag, 1997. Lect. Notes Comput. Sci. Vol. 1291.
8. **Chudnovsky D. V.** The computation of classical constants / D. V. Chudnovsky, G. V. Chudnovsky // Proc. Nat. Acad. Sci. U. S. A. Vol. 86, No. 21, 1989. – P. 8178–8182.

УДК 004.722.2

Н. И. ЛИСТОПАД, А. А. ХАЙДЕР, С. Ю. МИХНЕВИЧ, Белорусский
государственный университет информатики и радиоэлектроники

СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЯХ

Представлен новый подход к маршрутизации информационных потоков в мультисервисных сетях, базирующийся на сервисориентированной архитектуре. Показано, что по сравнению с известными подходами, учитывающими только требования заданного качества обслуживания, выбор оптимального пути с учетом требований QoS и величины стоимости является более корректным и позволяет из двух или нескольких примерно одинаковых путей выбрать один более оптимальный.

New approach for optimal routing of information flows is developed based on service-oriented architecture. To find the shortest path it's require to take into account the QoS-parameters such as delay, jitter, bandwidth, lost of the packets and cost of telecommunication resources.

Введение

Для мультисервисных сетей характерен комплекс услуг, таких как широкополосный доступ в Интернет, IP-телефонию, цифровое телевидение, видеоконференцсвязь и другие [1]. Для таких сетей кроме полосы пропускания важны такие параметры как потери пакетов, задержка пакетов, вариация времени задержки (джиттер). Задача маршрутизации в мультисервисных сетях должна решаться как на основе перечисленных критериев, так и с учетом

требований конкретных приложений. В целом, обеспечение заданного качества обслуживания (QoS) в этих сетях является сложной задачей многокритериальной оптимизации, для решения которой необходимы новые методы и подходы [1–3].

1. Модель резервирования информационных ресурсов

Пример оптимальной маршрутизации информационных потоков описан в работе [1], где сеть передачи данных представлена в виде графа (рис. 1). На рис. 1 приведены следующие

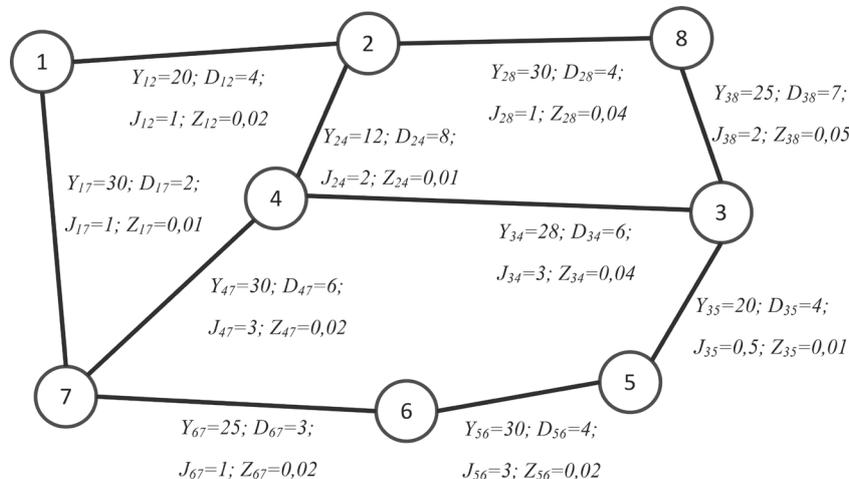


Рис. 1. Схема сети

щие обозначения. V – множество узлов сети, E – множество дуг e_{ij} , соединяющие узлы $i, j \in V$ телекоммуникационной сети (рис. 1) [4–5].

Пусть путь p – множество ребер, соединяющих узел источника и узел получателя t [1, 4–5]. В качестве QoS параметров каждого канала связи (ребра графа) будем рассматривать полосу пропускания Y_e , задержку D_e , вариации задержки J_e и вероятность потери пакетов Z_e . Численные значения параметров на рис. 1 взяты из работы [1].

Для каждого из возможных путей is, t в t будут справедливы следующие соотношения [1]:

$$\begin{aligned} Y_{s,t} &= \max_{e \in p} \{Y_e\}; D_{s,t} = \sum_{e \in p} D_e; \\ J_{s,t} &= \sum_{e \in p} J_e; Z_{s,t} = \prod_{e \in p} Z_e. \end{aligned} \quad (1)$$

В работе [1] показано, что если на всем пути p для каждого из QoS параметров будут выполнены ограничения вида:

$$\begin{aligned} Y_{s,t} &\geq Y^{min}; Z_{s,t} \leq Z^{max}; \\ D_{s,t} &\leq D^{max}; J_{s,t} \leq J^{max}, \end{aligned} \quad (2)$$

то такой путь называют QoS осуществимым (*feasible*) путем.

Как и в работе [1] для удобства дальнейшего анализа вместо вероятности потери пакетов Z_e будем рассматривать логарифм вероятности прохождения пакетов $X_e = \ln(1 - Z_e)$ [6], что позволяет значение X_e данного параметра на всем пути маршрутизации вычислять суммированием:

$$X_{s,t} = \sum_{e \in p} X_e, \quad (4)$$

Учет нескольких QoS параметров и различных требований приложений к значениям этих параметров значительно усложняет задачу маршрутизации. Для ее решения более эффективным представляется подход, базирующийся на сервис-ориентированной архитектуре (SOA) [6]. Следуя методике, изложенной в [6], SOA можно представить в виде двух уровней:

1. Уровень резервирования необходимых телекоммуникационных ресурсов для обеспечения заданного качества обслуживания.

2. Уровень предоставления соответствующих телекоммуникационных услуг для обеспечения требуемого качества обслуживания.

Задача резервирования ресурсов может быть сформулирована следующим образом: телеком-

муникационные ресурсы необходимо зарезервировать таким образом, чтобы пропускные способности каналов связи обеспечивали маршрутизацию требуемого объема трафика при соблюдении требований заданного качества обслуживания (QoS) в безаварийной и во всех аварийных ситуациях [5]. Другими словами, необходимо выбрать такой путь (пути), чтобы была обеспечено выполнение основных QoS требований вида (2) [5]. Данная задача успешно решена в работе [1]. Из работы [1] запишем следующую свертку функции r , объединяющей в себя все четыре требования заданного качества обслуживания: полосы пропускания $Y_{s,t}$, величины задержки $D_{s,t}$, джиттера $J_{s,t}$, и вероятности прохождения пакетов $X_{s,t}$.

$$r = -w_Y \frac{Y_{s,t}}{Y^{min}} + w_D \frac{D_{s,t}}{D^{max}} + w_J \frac{J_{s,t}}{J^{max}} + w_X \frac{X_{s,t}}{X^{min}} \quad (5)$$

Где из [1]:

$$\max_{P_{fes}} Y_{s,t} \Leftrightarrow \min_{P_{fes}} -Y_{s,t}; \min_{P_{fes}} X_{s,t}; \min_{P_{fes}} D_{s,t}; \min_{P_{fes}} J_{s,t}; \quad (6)$$

$$Y_{s,t} - Y^{min} \geq 0; X_{s,t} - X^{min} \geq 0; \quad (7)$$

$$D^{max} - D_{s,t} \geq 0; J^{max} - J_{s,t} \geq 0,$$

$$Y_{s,t} = \max_{e \in p} \{Y_e\}; D_{s,t} = \sum_{e \in p} D_e; \quad (8)$$

$$J_{s,t} = \sum_{e \in p} J_e; X_{s,t} = \sum_{e \in p} X_e.$$

В работе [1] показано, что поиск оптимального маршрута может быть осуществлен как решение задачи минимизации на графе скалярной функции $R_{s,t}$

$$\begin{aligned} \min_p R_{s,t} &= \min_p \left(-w_Y \frac{Y_{s,t}}{Y^{min}} + w_D \frac{D_{s,t}}{D^{max}} + \right. \\ &\left. + w_J \frac{J_{s,t}}{J^{max}} + w_X \frac{X_{s,t}}{X^{min}} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь w_Y, w_D, w_J, w_X – весовые коэффициенты, определяющие значимость соответствующих параметров QoS .

Для решения задачи (9) с учетом ограничений (7–8) в работе [1] предлагается использовать эвристический алгоритм, представляющий собой модификацию алгоритма Дейкстры [8]. Модификация заключается в отбрасывании в процессе поиска тех путей, на которых не выполняются ограничения (7), и новом способе описания и вычисления меток узлов.

Таким образом, в [1] решена задача первого уровня сервис-ориентированной архитектуры – резервирование необходимых телекоммуникационных ресурсов для обеспечения заданного качества обслуживания.

$$R_{sj} \begin{cases} r, & \text{если для } D_{st}, J_{st}, X_{st}, Y_{st} \text{ выполняются условия (7)} \\ \infty, & \text{если для } D_{st}, J_{st}, X_{st}, Y_{st} \text{ не выполняется хотя бы одно из условий (7)} \end{cases} \quad (10)$$

Используя численные значения параметров QoS (Y, D, J, X) для каждой из дуг, представленные на рис. 1, по формулам (8) рассчитаем их значения для каждого из возможных путей. Результаты расчета представлены в табл. 1.

Выберем следующие предельные параметры требований QoS : $Y^{\min} = 12$ МВ/с, $D^{\max} = 12$ мс, $J^{\max} = 7$ мс, $X = -0.07$

Из таблицы следует, что принятых предельных значениях параметров QoS только

три пути удовлетворяют требованиям (7): P2, P4, P5.

В табл. 2 представлены результаты расчета функции r при различных весовых коэффициентах w_i . Из таблицы следует, что при определенных комбинациях значений весовых коэффициентов w_i ряд путей имеет примерно одно и тоже значение функции r . Это комбинации под номерами 1 (пути P4 и P5); 3 (P4 и P5); 6 (P4 и P5); 7 (P2 и P4).

Критерии утверждения «имеют примерно одно и тоже значение» могут быть разными. В данном случае под примерно равными значениями функции r мы рассматривали все случаи, когда значения r не отличаются друг от друга более, чем на 10%.

2. Модель предоставления телекоммуникационных услуг с учетом требований заданного качества обслуживания

Рассмотрим более подробно задачу второго уровня – предоставление из набора зарезервированных самих услуг. Используя ранее вве-

Таблица 1. Результаты расчета параметров

Путь	Y [МВ/с]	D [МС]	J [МС]	X
1-2-8-3 (P1)	20	15	4	-0.11
1-2-4-3 (P2)	12	18	6	-0.07
1-2-4-7-6-5-3 (P3)	12	29	10.5	-0.1
1-7-6-5-3 (P4)	20	13	5.5	-0.06
1-7-4-3 (P5)	28	14	7	-0.07
1-7-4-2-8-3 (P6)	12	27	9	-0.13

Таблица 2. Результаты расчета функции r при различных значениях весовых коэффициентов

	w_Y	w_D	w_J	w_X	P2	P4	P5	Кратчайший путь
1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.75	0.54	0.6	P4≈P5
2	0.7	0.1	0.1	0.1	-0.41	-0.93	-1.35	P5
3	0	0.8	0.1	0.1	0.98	0.74	0.82	P4
4	0.6	0.2	0.2	0	-0.22	-0.69	-1.04	P5
5	1	0	0	0	-1	-1.66	-2.33	P5
6	0	1	0	0	1	0.72	0.77	P4≈P5
7	0	0	1	0	0.85	0.78	1	P2»P4
8	0	0	0	1	1	0.85	1	P4
9	0.5	0.5	0	0	0	-0.47	-0.77	P5
10	0	0.5	0.5	0	0.92	0.75	0.88	P4
11	0	0	0.5	0.5	0.92	0.82	1	P4
12	0.5	0	0	0.5	0	-0.40	-0.66	P5
13	0.25	0.25	0.25	0.25	0.46	0.17	0.11	P4≈P5
14	0.33	0.33	0.33	0	0.28	-0.05	-0.18	P5
15	0	0.33	0.33	0.33	0.94	0.78	0.91	P4
16	0.33	0	0.33	0.33	0.28	-0.007	-0.11	P5
17	0.33	0.33	0	0.33	0.33	-0.02	-0.18	P5

денные обозначения, сформулируем задачу следующим образом [6]:

$$\min \sum_{e \in p} \sum_{k=1}^m k_p(e) x_p(e) + d_k(e) L_k(e) \quad (11)$$

где k_p – стоимость выбора пути на всем отрезке от s к t ; $x_p(e) \in \{0, 1\}$; $d_p(e)$ – единица дополнительной стоимости, необходимой для обеспечения QoS требования; $L_k(e)$ – емкости зарезервированных телекоммуникационных ресурсов, необходимых для обеспечения заданного качества обслуживания: полосы пропускания, величины задержки, джиттера, вероятности потерь пакетов; m – количество QoS требований (в нашем случае $m = 4$).

Для $L_k(e)$ справедливо следующее: если $x_p(e) = 0$, то $L_k(e) = 0$; если $x_p(e) = 1$, то $L_k(e) \geq 0$ [7].

Таким образом, дальнейшая модификация алгоритма выбора кратчайшего пути состоит в том, чтобы из всех возможных путей, являющихся кратчайшими и удовлетворяющих требованиям заданного качества обслуживания QoS , выбрать такие из них, которые при этом обладали минимальной стоимостью. С учетом требований минимальной стоимости формула (5) может быть модифицирована следующим образом.

$$r = -w_Y d_Y (Y_{st}/Y_{min}) + w_D d_D (D_{st}/D_{max}) + w_J d_J (J_{st}/J_{max}) + w_X d_X (X_{st}/X_{min}), \quad (12)$$

где d_i – стоимости резервирования (использования, эксплуатации) соответствующих телекоммуникационных ресурсов. Смысл выражения (12) состоит в том, при примерно одинаковых значениях функции, определяющей выбор кратчайшего пути, выбирается тот путь, стоимость ресурсов которого минимальна. По сути дела речь идет о том, как из зарезервированных комбинаций 1, 3, 6, 7 выбрать оптимальный путь с точки зрения его стоимости.

Таблица 4. Результаты поиска кратчайшего пути

	d_Y				d_D	d_J	d_X	
	0.5				0.3	0.3	0.5	
	w_Y	w_D	w_J	w_X	$r(P2)$	$r(P4)$	$r(P5)$	Кратчайший путь с минимальной стоимостью
1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.267143	0.180952	0.193333	P4
2	0	1	0	0	0.3	0.216667	0.233333	P4
3	0	0	1	0	0.257143	0.235714	0.3	P4
6	0	0.8	0.1	0.1	0.315714	0.239762	0.266667	P4

Для реализации предложенного подхода была проведена дальнейшая модификация алгоритма, которая позволяет выбирать кратчайший путь не только с учетом требований заданного качества обслуживания, но и среди множества QoS осуществимых путей учитывать также стоимость выбираемого маршрута передачи информации.

Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2. Алгоритм состоит 5 основных частей.

I – выбор и ввод предельных значений параметров QoS : полосы пропускания, задержки, джиттера, вероятности потерь пакетов.

II – нахождение свертки функции r с целью определения множества QoS осуществимых путей.

III – алгоритм Дейкстры по поиску кратчайшего пути с учетом сформулированных требований.

IV – определение стоимости обеспечения требований QoS среди множества осуществимых путей.

V – поиск оптимального пути с учетом требований QoS и стоимости.

Результаты расчета выбора кратчайшего пути с учетом требований заданного качества обслуживания и стоимости представлены в таблицах 4–6. В таблице представлены коэффициенты стоимости d_j для обеспечения требований различных параметров QoS . Безразмерные значения d_j выбраны произвольным образом для иллюстрации предложенного метода поиска оптимального пути.

Таблица 3. Численные значения коэффициентов стоимости

d_Y	d_D	d_J	d_X
0.5	0.3	0.3	0.5
1	0.2	0.3	0.2
0.7	0.7	0.5	1

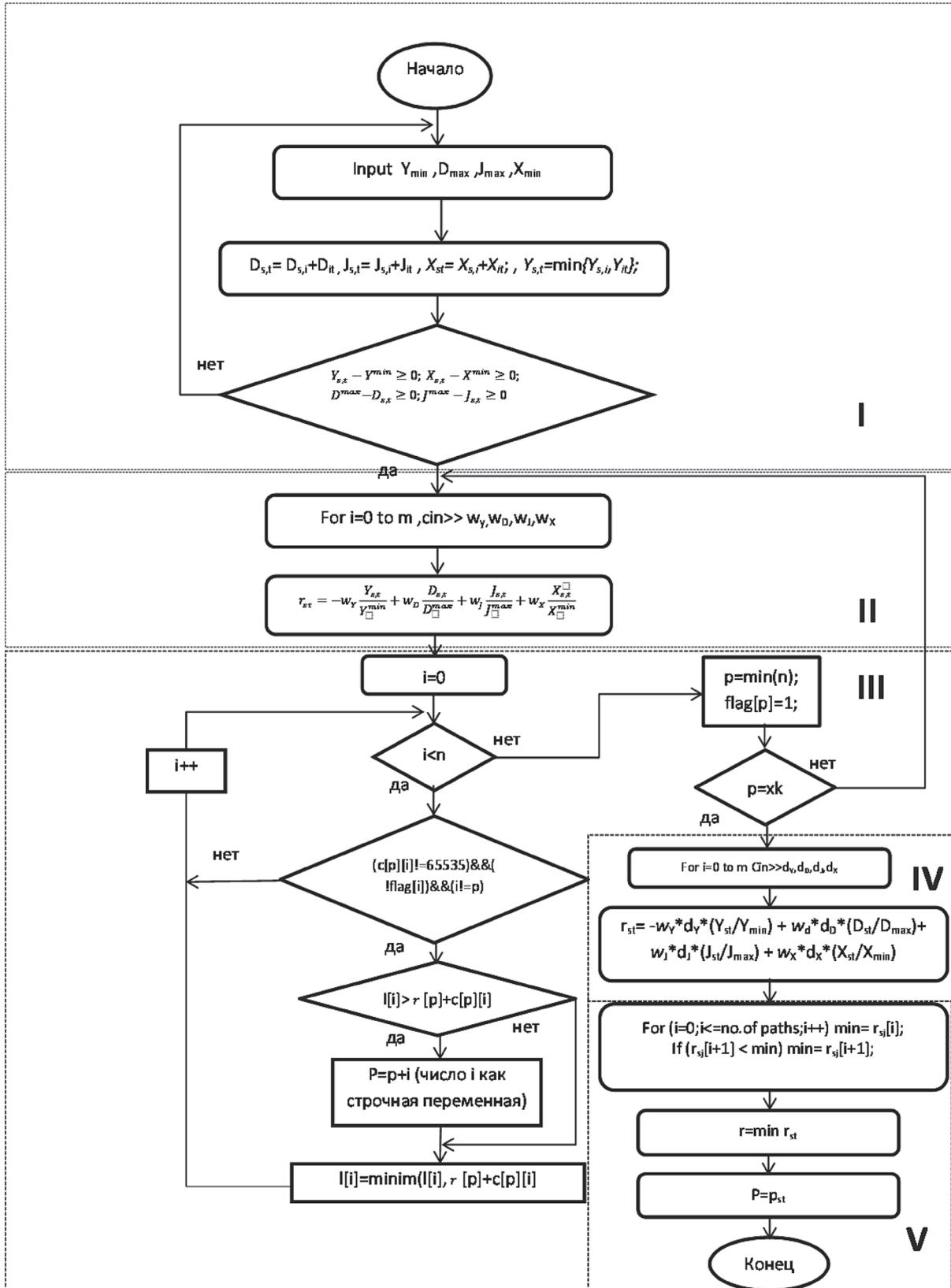


Рис. 2. Блок-схема модифицированного алгоритма поиска оптимального пути

Таблица 5. Результаты поиска кратчайшего пути

	d_Y				d_D	d_J	d_X	
	1				0.2	0.3	0.2	
	w_Y	w_D	w_J	w_X	$r(P2)$	$r(P4)$	$r(P5)$	Кратчайший путь с минимальной стоимостью
1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.097143	-0.00119	-0.036667	P5
2	0	1	0	0	0.2	0.144444	0.155556	P4
3	0	0	1	0	0.257143	0.235714	0.3	P4
6	0	0.8	0.1	0.1	0.205714	0.15627	0.174444	P4

Таблица 6. Результаты поиска кратчайшего пути

	d_Y				d_D	d_J	d_X	
	0.7				0.7	0.5	1	
	w_Y	w_D	w_J	w_X	$r(P2)$	$r(P4)$	$r(P5)$	Кратчайший путь с минимальной стоимостью
1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.568571	0.41	0.45	P4
2	0	1	0	0	0.7	0.505556	0.544444	P4
3	0	0	1	0	0.428571	0.392857	0.5	P4
6	0	0.8	0.1	0.1	0.702857	0.529444	0.585556	P4

Заключение

Для четырех различных значений коэффициентов стоимости был произведен выбор оптимального пути. Выбор производился из трех путей, которые удовлетворяли требованиям (7) QoS и которые были получены с помощью алгоритма Дейкстры.

Из полученных расчетов следует, что при различных заданных комбинациях весовых коэффициентов w_i и коэффициентов стоимости d_j выбор оптимального пути с учетом требований QoS и величины стоимости является более корректным и позволяет из двух или нескольких примерно одинаковых путей выбрать один более оптимальный.

Литература

1. Листопад Н. И., Воротницкий Ю. И., Хайдер А. А. Оптимальная маршрутизация в мультисервисных сетях телекоммуникаций на основе модифицированного алгоритма Дейкстры. // Вестник БГУ. Сер. 1. 2015. № 1. С. 70–76
2. Листопад Н. И. Модели оптимальной маршрутизации в компьютерных сетях / Н. И. Листопад, А. А. Матрук // Труды БГТУ. Серия VI. Физ.-мат. Науки и информ. – 2006. – Вып. XVI. – С. 130–132.
3. Листопад Н. И., А. Матрук Аль Даллаен, Копачев А. Г. Модели обеспечения живучести компьютерных сетей при оптимальной маршрутизации информационных потоков – Информатика. – 2006. – Вып.4. с. 39–48
4. Листопад Н. И., Величквич И. О. Оптимальная маршрутизация информационных потоков с учетом параметров QoS. // Доклады БГУИР. – 2012, № 4(66). – С. 111–116.
5. Girlich E., Kovalev M. M., Listopad N. I. Optimal choice of the capacities of telecommunication networks to provide QoS-routing // Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (Germany), Preprint N 21, 2009. – 14p.
6. Cardellini V., Casalicchio E., Grassi V., Pres ti F. L., Mirandola R. A Scalable Approach to QoS-Aware Self-adaptation in Service-Oriented Architectures / Quality of Service in Heterogeneous Networks / 6th International ICST Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness, Q Shine 2009 and 3rd International Workshop on Advanced Architectures and Algorithms for Internet Delivery and Applications, AAA-IDEA 2009, Las Palmas, Gran Canaria, November 23–25, 2009, Proceedings. P. 431–447.
7. Listopad N. I., Kopachev A. G., Matruk A. A. Quality of Service at the Computer Networks Based on Internet // Системні дослідження та інформації ні технології., Kiev, № 4. – 2006. – С 71–76.
8. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs. // NumerischeMathematik. V. 1 (1959), P. 269–271.

**УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНИЧЕСКИМИ
ОБЪЕКТАМИ**

**MANAGEMENT OF
TECHNICAL OBJECTS**

УДК 681.5(07)

М. ШЕЙХ ЭЛЬ НАЖЖАРИН, А. Г. СЕНЬКОВ, Белорусский национальный технический университет

МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА И АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПИД-РЕГУЛЯТОРА

В работе на примере системы автоматического регулирования температуры в помещении показана возможность использования пакета компьютерного моделирования Simulink для решения задач идентификации, моделирования и синтеза систем автоматического управления.

In the paper is considered a system of automatic control of the temperature in a room and is shown a method of its' synthesis by using components of Simulink software package.

В связи с повсеместным развитием современных компьютерных технологий существенно изменились подходы к решению задач анализа и синтеза систем автоматики. Прикладные пакеты MATLAB, DesignLab, WorkBanch, VisSim и др., используемые для исследования и проектирования электромеханических систем, позволили качественно изменить и существенно расширить возможности инженера.

В качестве примера использования системы компьютерной математики (СКМ) Matlab для моделирования, анализа и синтеза объектов и систем автоматики рассмотрим задачу синтеза системы автоматического регулирования (САР) температуры воздуха в помещении, в роли которого может использоваться учебный сушильный шкаф типа ШСУ, имеющий объем сушильной камеры 10 л и максимальную температуру нагрева 150 °С. Структурная схема САР изображена на рис. 1.

Для синтеза САР с типовым законом регулирования необходимо иметь математическое описание составляющих ее элементов (звеньев).

Получим теоретическим путем математическую модель помещения как объекта управления. Значение температуры воздуха в помещении θ зависит от двух величин: мощности работающего электронагревателя P и температуры наружного воздуха θ_H . В данном случае для упрощения последующих рассуждений мы будем пренебрегать другими обстоятельствами, которые могут влиять на температуру

в помещении, такими, например, как уровень солнечного освещения или скорость ветра снаружи. Для получения математической формулы, отражающей эту зависимость, будем руководствоваться сведениями из области теплофизики и теплообмена. В процессе нагрева помещения одна часть тепловой мощности электронагревателя P_1 расходуется на увеличение температуры в помещении, а другая часть P_2 – рассеивается наружу путем теплопередачи через стены. Соответствующие математические формулы имеют следующий вид:

$$P_1 = c \frac{d\theta}{dt}, \quad (1)$$

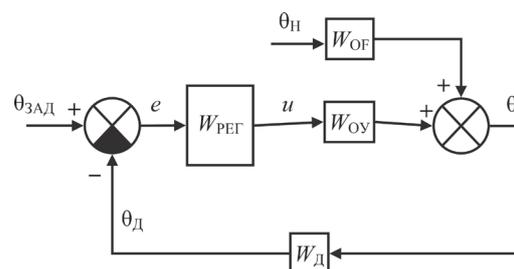


Рис. 1. Структурная схема САР температуры воздуха в помещении: θ – управляемая величина (температура); $\theta_д$ – значение температуры, измеряемое датчиком; $\theta_{зад}$ – заданное (требуемое) значение температуры; e – ошибка регулирования; u – управляющее воздействие регулятора на объект управления (ОУ); θ_H – возмущающее воздействие на ОУ (температура снаружи); $W_{ОУ}$ – передаточная функция ОУ по управляющему воздействию; $W_{ОФ}$ – передаточная функция ОУ по возмущающему воздействию; $W_Д$ – передаточная функция датчика; $W_{РЕГ}$ – передаточная функция регулятора

$$P_2 = \frac{S\kappa}{l}(\theta - \theta_H), \quad (2)$$

где c [Дж/°С] – теплоемкость помещения; S [м²] – площадь стен; κ [Вт/(м·°С)] – коэффициент теплопроводности стен (зависит от материала стен); l [м] – толщина стен.

Учитывая, что сумма обеих мощностей равна мощности электронагревателя, получим:

$$c \frac{d\theta}{dt} + \frac{S\kappa}{l}(\theta - \theta_H) = P.$$

Преобразуем эту формулу таким образом, чтобы все члены, содержащие выходную величину (температура θ), располагались в левой части уравнения, а входные величины (P и θ_H) – в правой части, получим в итоге математическое описание рассматриваемого объекта управления:

$$T \frac{d\theta}{dt} + \theta = KP + \theta_H, \quad (3)$$

где $T = \frac{cl}{S\kappa}$ [с.] – постоянная времени; $K = \frac{l}{S\kappa}$ [°С/Вт] – коэффициент преобразования.

Данное уравнение является линейным дифференциальным уравнением 1-го порядка. Передаточные функции ОУ по управляющему и возмущающему воздействиям, соответственно, равны:

$$W_{OY}(s) = \frac{K}{Ts + 1}, \quad (4)$$

$$W_{OF}(s) = \frac{1}{Ts + 1}. \quad (5)$$

Также теоретическим путем достаточно легко получить математическую модель датчика температуры, в качестве которого в нашем случае используется термосопротивление. Если такой датчик поместить в среду с некоторой температурой θ , отличной θ_D , то будет происходить теплообмен между чувствительным элементом датчика и окружающей средой, в результате чего температура датчика будет стремиться к температуре среды, при этом, соответственно, будет меняться и его сопротивление. Математически этот процесс будет описываться следующими формулами:

$$dQ = \kappa_D(\theta - \theta_D)dt, \quad (6)$$

$$dQ = c_D d\theta_D, \quad (7)$$

где dQ [Дж] – количество теплоты, переданное от окружающей среды датчику за малый промежуток времени dt ; θ_D [°С] – температура чувствительного элемента датчика; κ_D [Дж/(°С·с)] – некоторый постоянный коэффициент, характеризующий теплопроводность чувствительного элемента датчика; c_D [Дж/°С] – теплоемкость чувствительного элемента датчика (зависит от его массы и удельной теплоемкости металла).

Приравняв выражения (6) и (7), получим:

$$T_D \frac{d\theta_D}{dt} + \theta_D = \theta, \quad (8)$$

где $T_D = \frac{c_D}{\kappa_D}$ [с.] – постоянная времени датчика.

Передаточная функция датчика равна:

$$W_D(s) = \frac{1}{T_D s + 1}. \quad (9)$$

В нашем случае для измерения температуры использовалось термосопротивление Pt1000, для которого значение постоянной времени может быть определено из паспортной документации и составляет приблизительно $T_D \approx 20$ с.

Теоретический способ получения математической модели объекта в данном случае имеет тот недостаток, что с его помощью весьма затруднительно точно определить конкретные числовые значения входящих в выражения (3)–(5) коэффициентов K , T , так как они зависят от многих факторов (площадь и высота помещения, толщина и материал стен и т.д.) Поэтому в данной работе использовался смешанный способ получения математической модели объекта: структура модели (вид уравнения, связывающего вход и выход звена) определялась теоретическим путем, а значения коэффициентов – путем идентификации.

На вход объекта подавалось ступенчатое воздействие: электрический нагревательный элемент был включен, при этом значение выделяемой на нем тепловой мощности было постоянным и равнялось 100 Вт. Температура воздуха в сушильной камере каждые 3 с. измерялась термосопротивлением, подключенным к измерителю типа «Сосна-003МД», данные измерений передавались в компьютер. Для обработки результатов измерений и решения задачи идентификации использовались инструменты библиотеки System Identification, входящей в состав пакета Simulink. В качестве

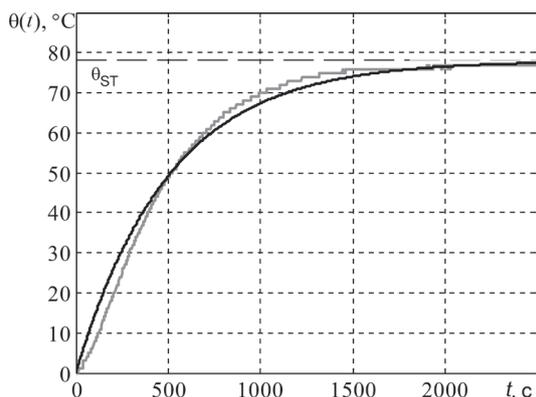


Рис. 2. График переходной функции объекта управления: кривая серого цвета – экспериментальная, кривая черного цвета – расчетная

структуры модели объекта была выбрана модель типа «вход-выход» (по английски «Output-Block», сокращенно ОЕ) [1], апериодическое звено 1-го порядка.

В результате была определена передаточная функция объекта управления по управляющему воздействию (рис. 2). Она оказалась равной:

$$W_1(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)}, \quad (10)$$

где $K \approx 0,78$ [°C/Вт]; $T_1 \approx 502$ с.

Для более точного совпадения экспериментальной и расчетной кривых структура модели в Simulink была задана также в виде апериодического звена 2-го порядка. Были получены следующие результаты расчета:

$$W_2(s) = \frac{K}{(T_3s + 1)(T_4s + 1)}, \quad (11)$$

где $K \approx 0,78$ [°C/Вт]; $T_3 \approx 391$ с.; $T_4 \approx 98$ с.

В качестве меры оценки точности идентификации использовалось максимальное по модулю отклонение расчетной кривой от экспериментальной:

$$\Delta = \max_t |\theta(t) - \theta_{\text{ЭКСП.}}(t)|. \quad (12)$$

Были получены следующие значения: $\Delta_1 = 9,9$ °C – для апериодического звена 1-го порядка, $\Delta_2 = 1,9$ °C – для апериодического звена 2-го порядка. Лучшая точность аппроксимации объекта с помощью апериодического звена 2-го порядка может объясняться тем, что передаточная функция (11) на самом деле является произведением передаточных функций двух последовательно соединенных звеньев:

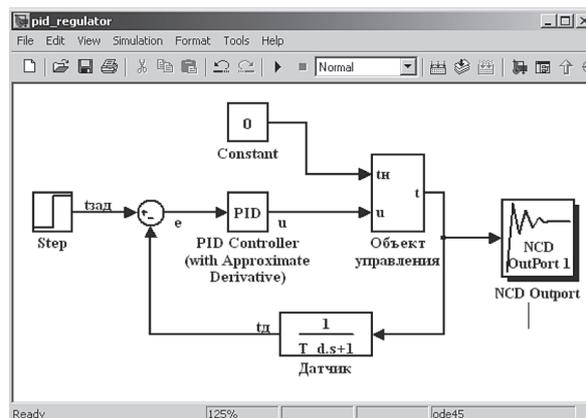


Рис. 3. Созданная в Simulink динамическая модель САР температуры в помещении

объекта управления (сушильного шкафа) и датчика температуры:

$$W_2(s) = W_{\text{ОУ}}(s)W_{\text{Д}}(s). \quad (13)$$

Таким образом, из (13) можно выразить передаточную функцию объекта управления по управляющему воздействию:

$$W_{\text{ОУ}}(s) = \frac{W_2(s)}{W_{\text{Д}}(s)} = \frac{K(T_{\text{Д}}s + 1)}{(T_3s + 1)(T_4s + 1)}. \quad (14)$$

Задача синтеза САР на основе ПИД-регулятора состоит в определении значений коэффициентов K_p , K_I и K_d , при которых обеспечивается требуемое качество регулирования САР. Для настройки коэффициентов ПИД-регулятора используем входящий в состав Simulink компонент NCD Outport, реализующий графический интерфейс для настройки параметров динамических систем. Simulink-модель рассматриваемой системы показана на рис. 3.

В качестве устройства управления в данной схеме используется компонент PID Control-

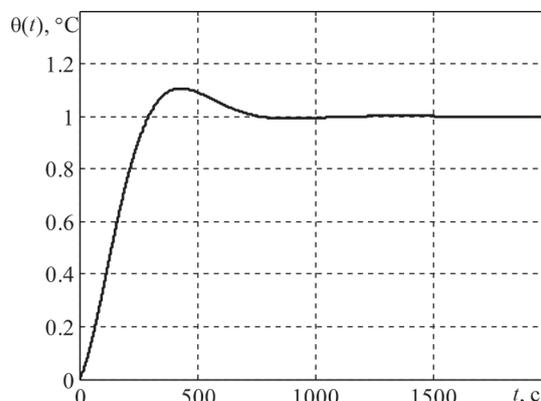


Рис. 4. Переходная функция САР по задающему воздействию при полученных в результате настройки значениях коэффициентов ПИД-регулятора

ler (with Approximate Derivative), представляющий собой модель реального ПИД-регулятора. Ограничения, задаваемые для коэффициентов ПИД-регулятора, обусловлены соображениями конечной величины управляющего воздействия u :

$$\begin{aligned} 0 \leq K_p &\leq 10, \\ 0 \leq K_I &\leq 0,5, \\ 0 \leq K_d &\leq 0,1. \end{aligned} \quad (15)$$

Требуемые показатели качества регулирования: нулевая статическая ошибка $e_{СТ} = 0$;

перерегулирование $\sigma \leq 20\%$; время регулирования $t_{РЕГ} \leq 720$ с.

В результате получены следующие значения коэффициентов ПИД-регулятора: $K_p = 3,6182$; $K_I = 0,0095$; $K_d = 0,01$. Вид переходного процесса САР по задающему воздействию показан на рис. 4.

Таким образом, СКМ Matlab и входящий в ее состав пакет моделирования Simulink предоставляют инженеру достаточно широкие возможности и удобные средства моделирования работы и синтеза систем автоматического управления динамическими объектами.

Литература

1. Дьяконов В., Круглов В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник. – СПб: – Питер, 2001.

УДК 621.311.24.01

С. А. САНКЕВИЧ, Ю. Н. ПЕТРЕНКО, Белорусский национальный технический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Решается задача непрерывной адаптации частоты вращения ротора турбины к переменной скорости ветра. Это позволяет поддерживать оптимальное соотношение скоростей, что обеспечивает получение максимальной выходной мощности. Избыток мощности компенсируется торможением. Приведена разработанная имитационная модель и результаты моделирования.

This paper focuses on the development and simulation of maximum wind power extraction algorithms for inverter-based variable speed wind power generation systems. System simulation results have confirmed the functionality and performance of the system.

Введение

Развитию возобновляемых источников энергии (ВИЭ) ныне уделяется пристальное внимание во всех странах мира и на всех континентах [1]. Среди всех видов ВИЭ особое место занимает энергия ветра, которая имеет свои специфические свойства – доступность с одной стороны, и непостоянство, обусловленное вероятностным характером прогноза. Существует множество решений по составу и режимам работы ветроэлектрических установок (ВЭУ), зависящих от разных факторов [2]. Естественно на первый план выступает проблема оптимизации режимов работы ВЭУ.

Широко применимы ВЭУ с переменной скоростью вращения генератора, позволяющие получать больше энергии, чем установки с постоянной скоростью вращения. Это связано с тем, что ВЭУ с переменной скоростью вращения проектируются таким образом, чтобы обеспечить максимальное значение аэродинамической эффективности в возможно более широком диапазоне скорости ветра.

Функциональный состав и режимы работы ветроэлектрических установок

Задачей является непрерывная адаптация частоты вращения ротора ω к переменной скорости ветра v_w . Это позволяет поддерживать оптимальное соотношение скоростей λ (быстротности), что обеспечивает получение

максимальной выходной мощности. Таким образом имеет место главное преимущество турбины с переменной скоростью вращения – извлечение большей мощности. Однако проблема не только в этом: необходимо также ограничить мощность при достижении некоторой граничной скорости ветра. Согласно принятой практике используется два вида ограничения [3]: механическое торможение (МТ) и электрическое торможение (ЭТ1) или их комбинация МТ и ЭТ2, (рис. 1).

Для конкретизации задачи далее рассмотрим ВЭУ (рис. 2) с синхронным генератором с постоянными магнитами (СПМ), соединенным с потребителем и сетью через автономный инвертор напряжения (АИН), схему управления которым здесь не рассматриваем. В представленной на рис. 2 схеме для ограничения мощности ВЭУ в её системе управления используются четыре различных подсистемы: система управления шагом лопастей; контроллер выходного напряжения генератора; контроллер торможения в звене постоянного тока; контроллер выходной мощности АИН.

Имеется несколько подходов к управлению аэродинамическими усилиями ротора турбины с целью ограничения мощности при высоких скоростях ветра с целью предотвращения поломки турбины. Самый простой и дешевый способ – пассивное управление. При таком методе ограничения лопасти жестко крепятся

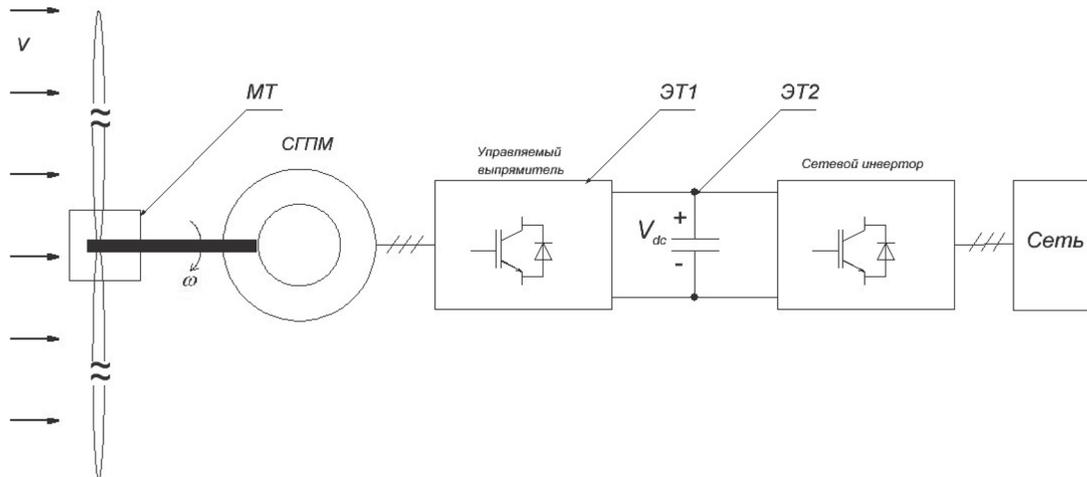


Рис. 1. Функциональный состав ВЭУ

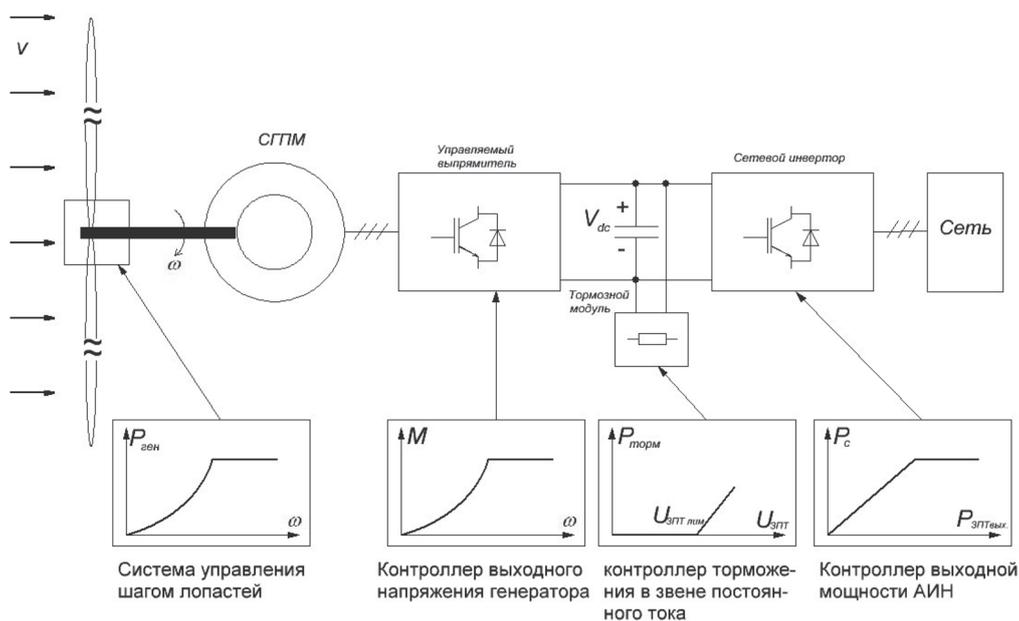


Рис. 2. Структура системы управления ВЭУ

к ступице ветроколеса, а ограничение выходной мощности осуществляется за счет аэродинамической формы самих лопастей. Второй подход – это активное управление углом поворота лопастей при изменении скорости ветра. Преимуществом этого метода является хорошее управление мощностью, возможности плавного пуска и аварийной остановки. Особенностью данного способа является возможность получения мощности близкой по величине к номинальной мощности генератора при высокой скорости ветра. недостатком является усложнение механизма регулирования, а также колебания мощности при высокой скорости ветра.

В данной работе рассматривается ВЭУ с активным управлением углом поворота ло-

пастей. Управление углом осуществляется по изменению выходной мощности. структура такой системы представлена на рис. 3, где: РМ – регулятор мощности; ИМ – исполнительный механизм, в качестве которого может применяться гидро- или электропривод.

Естественными значениями ограничений являются максимальное и минимальное значение угла β_{\max} , β_{\min} и его производной. Таким образом, контур регулирования содержит нелинейность типа «насыщение» по переменной β и ее производной. Передаточную функцию ИМ можно представить в виде [3] рис. 4, где K_1 – коэффициент усиления системы. Пренебрегая насыщением, ИМ может быть представлен как система первого порядка:

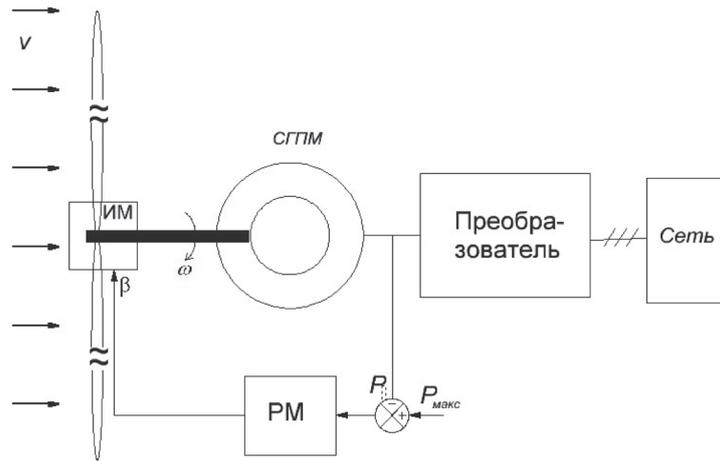


Рис. 3. Функциональная схема регулятора угла поворота лопастей

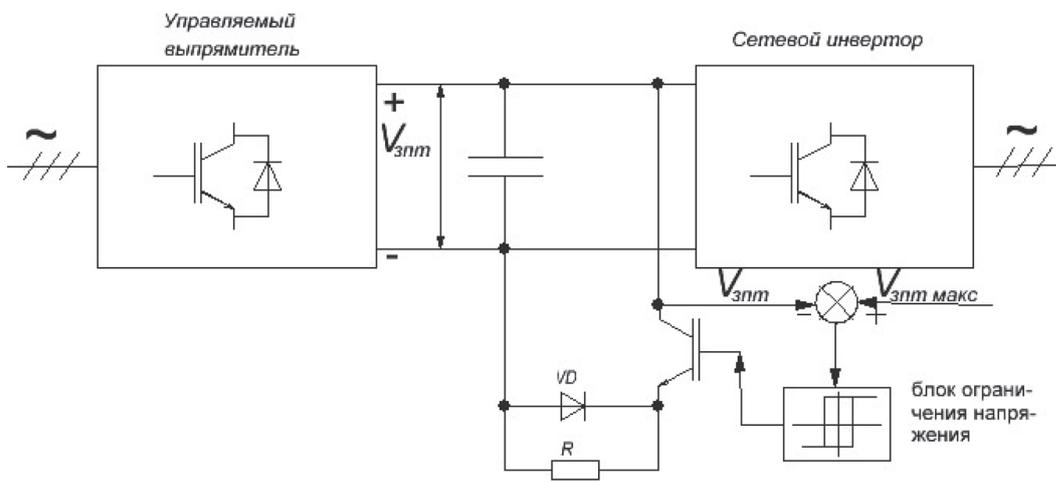


Рис. 4. Силовая схема преобразователя ВЭУ

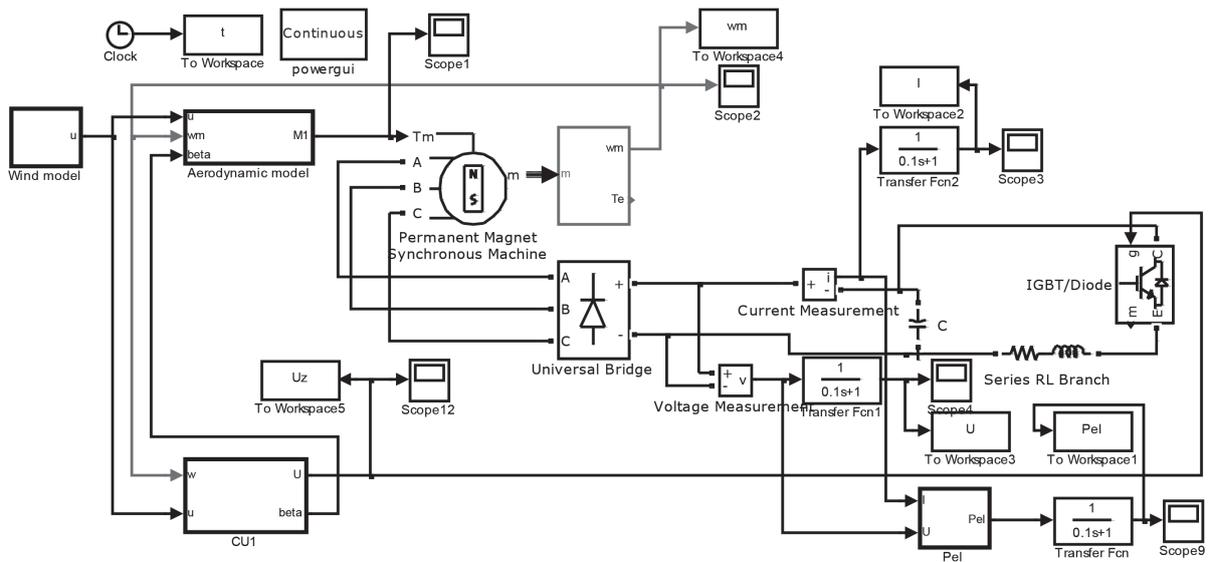


Рис. 5. Общий вид модели ВЭУ

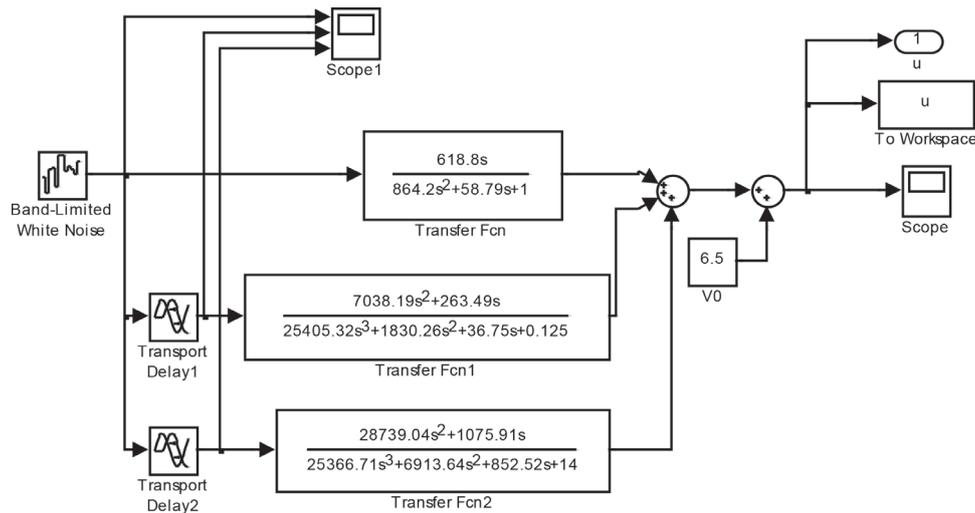


Рис. 6. Динамическая модель ветра

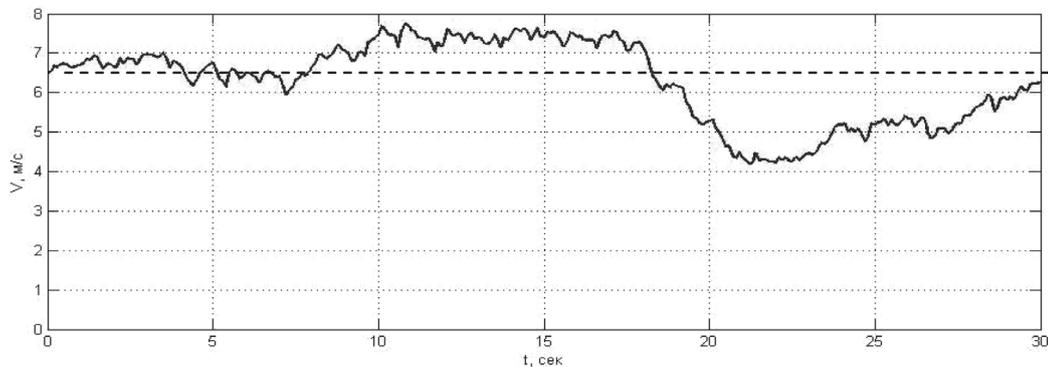


Рис. 7. Скорость ветра

$$W_{\text{им}}(p) = \frac{K_{\text{им}}}{K_{\text{им}} + p}; \quad (1)$$

$$K_{\text{им}} = 1 / T_{\beta}, \quad (2)$$

где T_{β} – постоянная времени системы.

Торможение в звене постоянного тока

СПИМ позволяет перегрузки в определенные интервалы времени. При таком условии можно обеспечить торможение турбины посредством тормозного модуля в звене постоянного тока. Силовая схема преобразователя ВЭУ представлена на рис. 4.

Имитационное моделирование и его результаты

Моделированию производилось с помощью программы Matlab в среде Simulinkode23tbc переменным шагом. Общий вид модели ВЭУ представлен на рис. 5. В качестве объекта моделирования была взята ВЭУ малого класса с номинальной мощностью 4 кВт, при номинальной скорости ветра 6,5 м/с. Тип ветроко-

леса – трехлопастное с горизонтальной осью вращения, радиусом 5 м, профиль лопасти «эксперо». Максимальный коэффициент использования энергии ветра (КИЭФ) для данного типа колес равен 0,47, при значении быстроходности $\lambda_{\text{ном}} = 8,1$ и $\beta_{\text{ном}} = 0^\circ$ [4]. Ветроколесо снабжено системой управления шагом, при значении угла $\beta_{\text{макс}} = 90^\circ$ колесо флюгируется. Передаточное число мультипликатора 20. Генератор синхронный с постоянными магнитами трехфазный с номинальным моментом 24 Нм, с номинальной частотой вращения 2300 об/мин. Выпрямитель трехфазный мостовой неуправляемый. Емкость конденсаторов в звене постоянного тока 0,3 мФ. В качестве силового ключа для тормозного модуля использован IGBT транзистор. Значение тормозного сопротивления 2,5 Ома. Максимальное значение напряжения в звене постоянного тока 300 В.

Динамическая модель ветра представлена на рис. 6, основанная на описании турбулентности Девенпортом [5], а на рис. 7 представ-

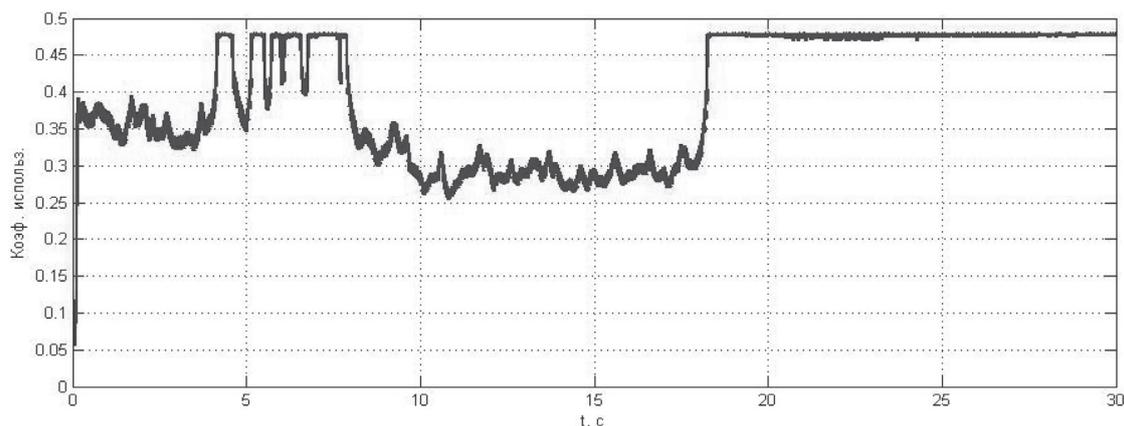


Рис. 8. Коэффициент использования энергии ветра

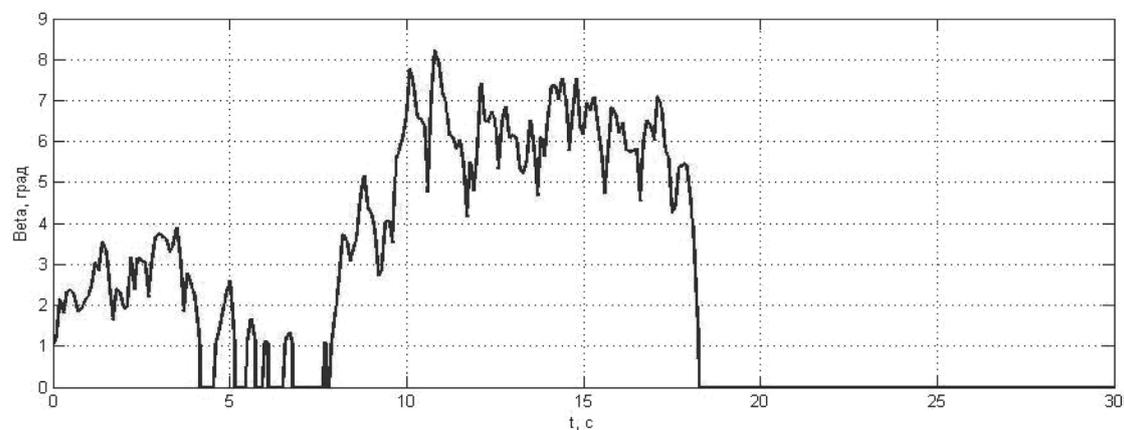
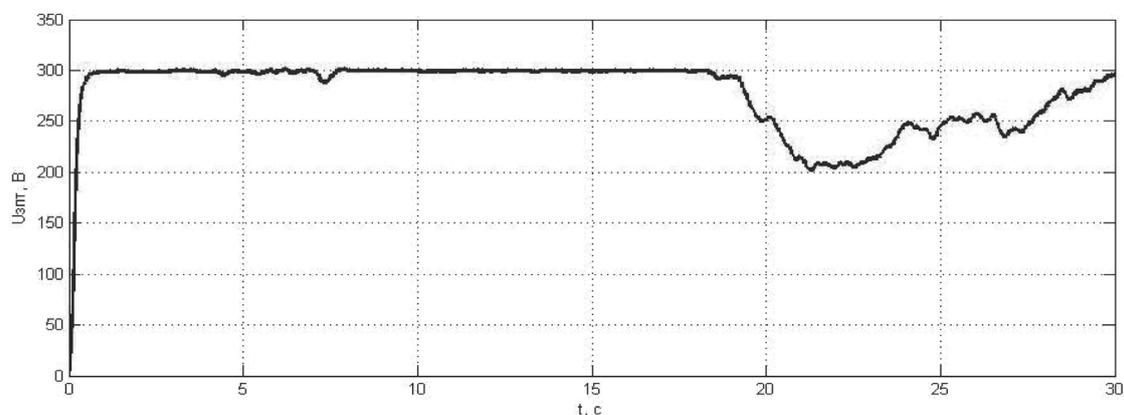
Рис. 9. Значения угла установки лопастей β 

Рис. 10. Напряжение в звене постоянного тока

лен результат моделирования скорости ветра с помощью данной модели.

На рис. 8 приведен результат моделирования коэффициента использования энергии ветра, а на рис. 9 — значения угла установки лопастей β . Следует отметить, что на участки времени от 10 до 17 с, когда скорость ветра выше номинального значения 6,5 м/с, вступает в работу система управления углом, дабы не допустить перенапряжения на генераторе (рис. 9). На участке вре-

мени от 19 до 30 с моделирования происходит просадка скорости ветра ниже номинальной, но при этом КИЭФ стремится к своему максимальному значению 0,47 для данного ветроколеса, при $\beta = 0^\circ$. Это означает, что ВЭУ работает с максимально возможным КПД для данного ветра. Скорость, а следовательно напряжение генератора при этом должны быть уменьшены до значений меньше номинальных (рис. 10), путем сброса излишка энергии через тормозной мо-

дуль и тормозной резистор. Однако в качестве тормозного резистора могут выступить различные накопители энергии, способные эффективно утилизировать энергию.

Заключение

В работе приведены результаты моделирования, которые показывают преимущество

управления посредством комбинации управления шагом ветроколеса и ограничением энергии на уровне звена постоянного тока с помощью тормозного модуля. Представленная модель позволяет исследовать системы с большим количеством параметров, нежели стандартная модель ВЭУ в Simulink.

Литература

1. Global Wind Energy Council // Global Wind Statistics 2012 [Electronic resource]. – Brussels, 2013. – Mode of access: http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/glob_cum_inst_wind_cap_1996-2012.jpg. – Date of access: 04.04.2013.
2. Санкевич С. А. Анализ функциональных схем электрической части ветроэлектрических установок / С. А. Санкевич, Ю. Н. Петренко // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2014. – № 2. – С. 10–20.
3. Wang D., Chang L. «An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems», IEEE Transactions in Power Electronics, vol. 19, no. 5, pp. 1242–1249, September 2004.
4. Кривцов В. С., Олейников А. М., Яковлев А. И. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветроэлектрогенераторы – Харьков: ХАИ, 2003. – 400 с.
5. Матвеев О. В. Моделирование на ЭВМ динамической составляющей скорости ветра в зависимости от времени / О. В. Матвеев, И. М. Кирпичникова // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. – 2010. – № 1.
6. Санкевич С. А., Петренко Ю. Н. Оптимизация режимов работы ветроэнергетической установки. Системный анализ и прикладная информатика, № 1–2, 2013, с. 26–31.
7. Санкевич С. А. Моделирование системы управления ветроэлектрической установки / С. А. Санкевич, Ю. Н. Петренко // Информационные технологии в образовании, науке и производстве: II Международная научно-техническая интернет-конференция, 4 декабря 2014 г. Секция: Информационные технологии в производстве и научных исследованиях [Электронный ресурс]. – [Б. и.], 2014. URI: <http://rep.bntu.by/handle/data/12622>.

УДК 533.6

Ю. В. ЯЦКЕВИЧ, Ю. В. КОЖЕДУБ, Белорусский национальный технический университет,
Минский государственный высший авиационный колледж

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ОБТЕКАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ВОЗДУШНЫМИ ПОТОКАМИ И РАСЧЕТ ЕГО АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

В работе описывается оригинальная полуэмпирическая модель турбулентного течения воздуха в пограничном слое на поверхности летательного аппарата. На основе этой модели разработана компьютерная система, позволяющая моделировать аэродинамические процессы вокруг летательного аппарата и по результатам моделирования рассчитывать его аэродинамические характеристики. Эти характеристики используют авиаконструкторы для оценки качества и свойств летательного аппарата.

The original semiempirical model of turbulent flow of air in an interface of an aircraft surface is described in this work. Based on this model the computer system allowing to simulate aerodynamic processes around an aircraft and to calculate its aerodynamic characteristics was developed. These characteristics are used by aircraft designers for an assessment of quality and properties of an aircraft.

Современный уровень проектирования летательных аппаратов подразумевает использование тех или иных методов компьютерного моделирования аэродинамической среды, обтекающей 3d-модель планера при его движении.

Поиск приемлемых для практики форм математического описания турбулентных течений или моделей турбулентности идет уже на протяжении более 100 лет (начиная с классических работ О. Рейнольдса). Это объясняется исключительной сложностью турбулентности как физического явления.

Турбулентные течения, согласно современным представлениям, подчиняются классическим уравнениям Навье-Стокса, и в этом смысле проблема может считаться давно решенной. Однако, несмотря на фантастический прогресс вычислительной техники, наблюдаемый в последние десятилетия, ее возможности все еще недостаточны для решения этих уравнений при высо-

ких разрешениях расчетной сетки (малых шагах дискретизации пространства), представляющих практический интерес. Такая ситуация по самым оптимистичным прогнозам останется вплоть до второй половины, а то и до конца XXI века [1]. В связи с этим, как и ранее, ключевым вопросом в рассматриваемой области является поиск приемлемого компромисса между физической адекватностью модели и приемлемым для практического применения уровнем ее сложности.

Данная работа посвящена оригинальному программному обеспечению («АэроПро-1»), построенному на основе разработанной авторами относительно простой полуэмпирической «подсеточной» модели турбулентного течения на основе уравнения Рейнольдса. То есть, расчет распределения скорости $v(x, y, z, t)$ по трехмерному пространству моделируемой воздушной среды производился на основе уравнения Рейнольдса [2]:

$$\begin{cases} \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\eta}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) - \frac{\overline{\partial v'_x v'_y}}{\partial y} - \frac{\overline{\partial v'_x v'_z}}{\partial z}, \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\eta}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) - \frac{\overline{\partial v'_y v'_x}}{\partial x} - \frac{\overline{\partial v'_y v'_z}}{\partial z}, \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\eta}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) - \frac{\overline{\partial v'_y v'_z}}{\partial y} - \frac{\overline{\partial v'_x v'_z}}{\partial x}, \end{cases} \quad (1)$$

где t – время; x, y, z – декартовы координаты (ось Y направлена вертикально); u_x, u_y, u_z – проекции скорости воздуха на координатные оси X, Y, Z соответственно; P – давление воздуха; ρ – плотность воздуха; η – динамическая вязкость воздуха; u'_x, u'_y, u'_z – пульсации соответствующих проекций скорости воздуха внутри сеточного элемента.

Расчет распределения плотности $\rho(x, y, z, t)$ на основании трехмерного поля скоростей $u(x, y, z, t)$ производился по уравнению неразрывности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + u_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + u_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + u_z \frac{\partial \rho}{\partial z} = \\ = \rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Пересчет распределения плотности $\rho(x, y, z, t)$ в поле давлений $P(x, y, z, t)$ производился по уравнению Менделеева-Клапейрона:

$$P = \frac{\rho}{M} RT, \quad (3)$$

где T – температура воздуха; $M = 0,029$ кг/моль – молярная масса воздуха; $R = 8,3144$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная.

Данная система уравнений (1–3) является не замкнутой. Для их замыкания нужно определить 6 компонент турбулентных (Рейнольдсовых) напряжений $u'_i u'_j$.

Для определения Рейнольдсовых напряжений используется понятие пограничного слоя. Пограничный слой – тонкий по сравнению с характерным линейным размером тела слой жидкости или газа, прилегающий к твердой поверхности, в котором градиенты газодинамических переменных в нормальном к стенке направлении столь велики, что инерционные силы и силы трения имеют здесь один и тот же порядок. Течение в этом слое при больших числах Рейнольдса становится турбулентным. Понятие пограничного слоя [3] для анализа движения жидкости при больших числах Рейнольдса было предложено Л. Прандтлем (1904).

Разработанная модель основывается на эмпирических наблюдениях за поведением турбулентного слоя, смоделированного методом прямого численного моделирования (Direct Number Simulation – DNS) для малого участка поверхности (1×5 см). При этом использовался шаг сетки от 0,05 до 0,2 мм. DNS-модель построена на основе уравнений Навье-Стокса, уравнения неразрывности и уравнения Менделеева-Клапейрона [4]. Эта модель полностью свободна от эмпиризма (в данной статье не рассматривается). Она позволила выявить основные закономерности возникновения и развития турбулентного слоя в зависимости от шероховатости поверхности, скорости и угла набегающего ламинарного потока по отношению к обтекаемой поверхности (локального угла атаки).

Упрощенно предполагается, что пограничный слой до момента отрыва состоит из движущихся цилиндрических вихревых областей (вихрей), диаметр δ_w которых равен толщине слоя δ . Линейная скорость воздуха прилегающего к твердой поверхности равна 0. Воздух на внешнем крае пограничного слоя (внешняя часть вихрей) имеет скорость набегающего ламинарного потока u . Таким образом, центр вращения вихря (и сам вихрь) перемещается со скоростью $u_w = u/2$ в направлении воздушного потока.

Исходя из этого представления, Рейнольдсовы напряжения зависят от толщины пограничного слоя (диаметра вихрей) и скорости ламинарного потока (усредненной скорости) приблизительно так:

$$u'_x u'_y \approx \begin{cases} \left(\frac{1}{3} \frac{\delta}{\Delta y} u_x \right)^2, & \text{при } \delta \leq \Delta y, \\ \left(\frac{1}{3} \frac{\Delta y}{\delta} u_x \right)^2, & \text{при } \delta > \Delta y, \end{cases} \quad (4)$$

где u'_x – пульсация скорости воздуха вдоль обтекаемой поверхности; u'_y – пульсация скорости воздуха вдоль нормали к обтекаемой поверхности; $u'_x u'_y$ – Рейнольдсово напряжение; δ – толщина пограничного слоя; u_x – проекция скорости ламинарного потока на обтекаемую поверхность; Δy – высота сеточного элемента.

Как показало DNS-моделирование, турбулентный вихрь появляется на поверхности при наличии неровности и еще двух условиях:

1) набегающий поток направлен от поверхности, то есть локальный угол атаки внутри сеточного элемента не отрицательный ($\alpha_1 \geq 0$);

2) скорость набегающего воздушного потока достаточно велика ($u \geq u_0$).

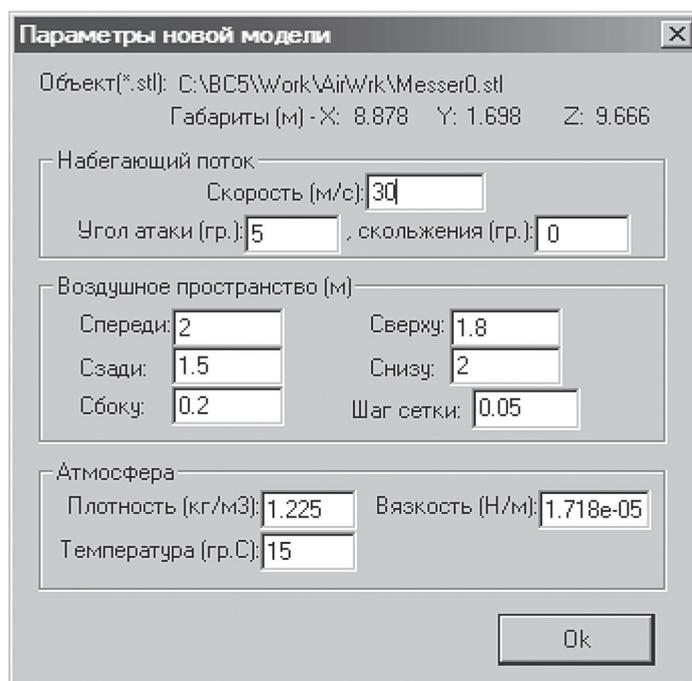


Рис. 1. Панель задания входных параметров при создании новой модели

Значение v_0 зависит от шероховатости поверхности. В данной работе принимается $v_0 = 7$ м/с, что соответствует наличию на поверхности неровностей высотой 0,4 мм.

По мере перемещения вихря вдоль набегающего потока наблюдается рост его геометрических размеров в результате вовлечения во вращательное движение окружающих масс воздуха. Этот процесс характеризуется скоростью роста толщины турбулентного пограничного слоя ($K_\delta = \Delta\delta/\Delta t$). По результатам численных экспериментов с различными скоростями набегающего потока была установлена средняя величина скорости роста толщины турбулентного потока – $K_\delta \approx 2$ м/с.

Кроме роста размеров вихрей на геометрическую конфигурацию турбулентного слоя оказывает влияние усредненная скорость течения воздуха. В целом изменение толщины турбулентного слоя в разработанной модели описывается уравнением:

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + v_x \frac{\partial \delta}{\partial x} + v_y \frac{\partial \delta}{\partial y} + v_z \frac{\partial \delta}{\partial z} = K_\delta. \quad (5)$$

Таким образом, уравнения (1–5) представляют собой замкнутую систему, описывающую динамику воздушных потоков в пространстве вокруг летательного аппарата. В нее также необходимо включить условия образо-

вания турбулентного слоя ($\alpha_1 \geq 0$ и $v \geq v_0$), то есть в компьютерной модели анализируется угол наклона набегающего потока к обтекаемой поверхности в каждом граничном конечно-разностном элементе.

Эта математическая модель была положена в основу компьютерной модели, в которой моделируемое пространство разбивается на прямоугольные элементы (прямоугольную сетку). Элементы, пересекающие поверхность твердого объекта, имеют трапециевидную форму (конечно-объемное представление на границах твердого объекта).

Кроме описания геометрии объекта в формате «*.stl» входными данными для моделирования являются: скорость набегающего потока, угол атаки (угол между направлением воздушного потока и продольной осью самолета в вертикальной плоскости), угол скольжения (угол между направлением воздушного потока и продольной осью самолета в горизонтальной плоскости), размеры воздушного пространства с разных сторон относительно летательного аппарата, а также – характеристики атмосферы (рис. 1).

На рис. 2, 3 представлены результаты моделирования в виде полей скоростей и давлений воздуха по сечениям моделируемого пространства, а также в проекциях на поверхность самолета.

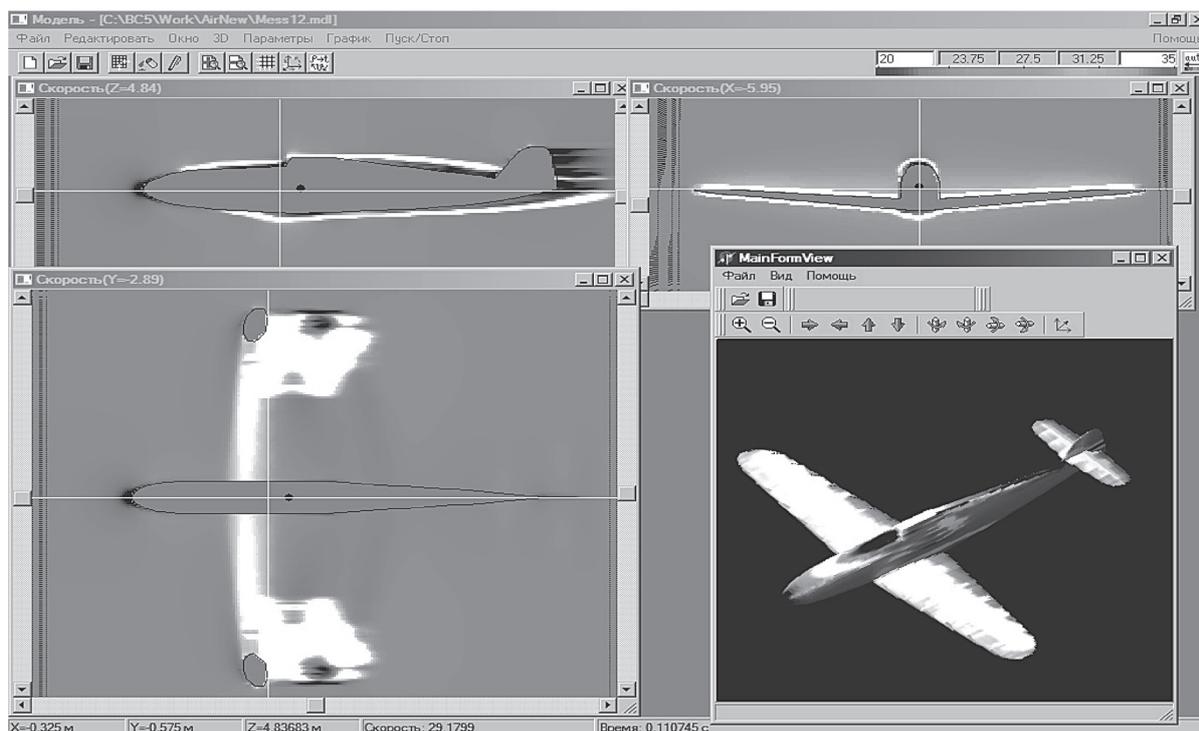


Рис. 2. Интерфейс программы при отображении распределения скоростей воздуха по сечениям моделируемого пространства и по поверхности самолета при угле атаки набегающего потока $\alpha = 0^\circ$

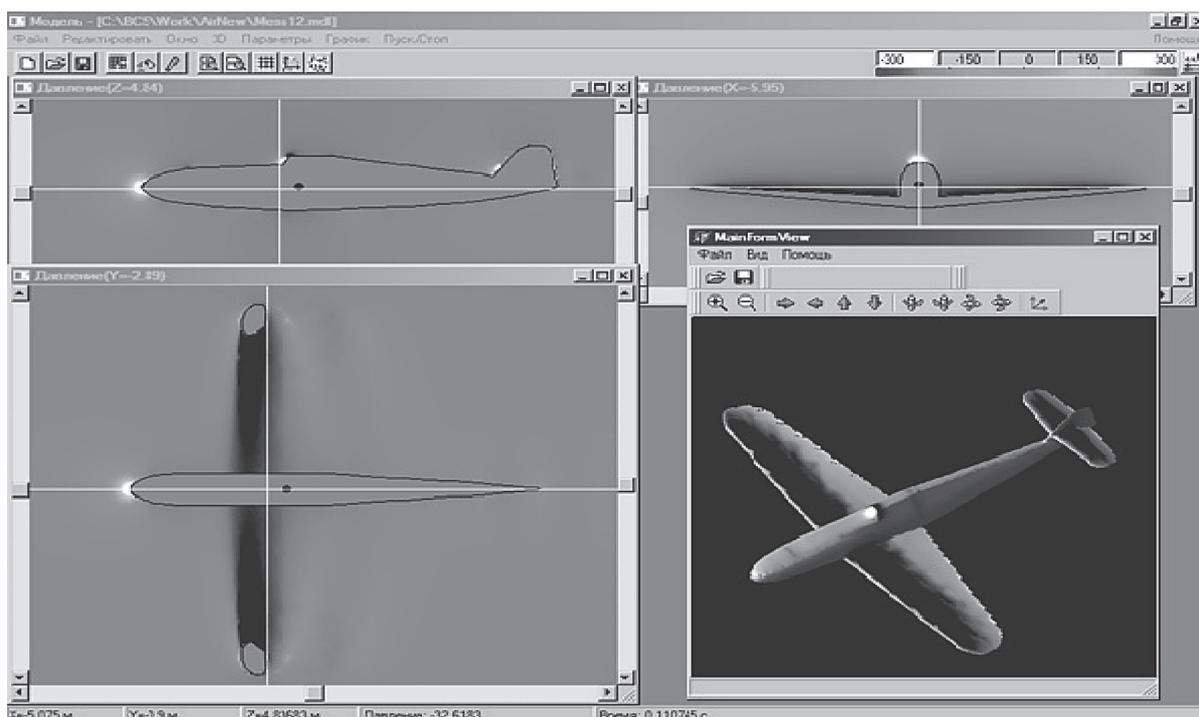


Рис. 3. Интерфейс программы при отображении распределения давлений воздуха по сечениям моделируемого пространства и по поверхности самолета при угле атаки набегающего потока $\alpha = 0^\circ$

На основе полученных трехмерных полей давлений рассчитываются основные аэродинамические характеристики самолета [5] (лобовое сопротивление и подъемная сила, моменты тангажа, рыскания и крена).

Аэродинамические характеристики вычислялись следующим образом. Вначале вычислялись силы давления, действующие с разных сторон на самолет, путем суммирования сил давления каждого конечно-объемного

элемента, пересекающего поверхность объекта:

$$F_n = \sum_{\substack{(x,y,z) - \text{воздух} \\ (x+\Delta x,y,z) - \text{тело}}} (P(x,y,z) - P_0) \Delta y \Delta z, \quad (6)$$

$$F_3 = \sum_{\substack{(x,y,z) - \text{воздух} \\ (x-\Delta x,y,z) - \text{тело}}} (P(x,y,z) - P_0) \Delta y \Delta z, \quad (7)$$

$$F_в = \sum_{\substack{(x,y,z) - \text{воздух} \\ (x,y-\Delta y,z) - \text{тело}}} (P(x,y,z) - P_0) \Delta x \Delta z, \quad (8)$$

$$F_n = \sum_{\substack{(x,y,z) - \text{воздух} \\ (x,y+\Delta y,z) - \text{тело}}} (P(x,y,z) - P_0) \Delta x \Delta z, \quad (9)$$

где F_n – сила давления, действующая на объект спереди, F_3 – сзади, $F_в$ – сверху, F_n – снизу, $P(x,y,z)$ – давление в конечно-разностном элементе с координатами (x,y,z) ; $P_0 = 105005$ Па – нормальное давление воздуха; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – шаг конечно-разностной сетки.

Затем, на основании полученных сил, действующих с разных сторон на объект, вычислялись лобовое сопротивление:

$$X = F_n - F_3, \quad (10)$$

подъемная сила:

$$Y = F_n - F_в, \quad (11)$$

коэффициент лобового сопротивления:

$$C_X = \frac{2X}{S_n \rho_0 v_\infty^2}, \quad (12)$$

коэффициент подъемной силы:

$$C_Y = \frac{2Y}{S_n \rho_0 v_\infty^2}, \quad (13)$$

где S_n – площадь несущей поверхности (вертикальной проекции самолета), ρ_0 – нормальная плотность воздуха (на бесконечном удалении от самолета); v_∞ – скорость воздуха на бесконечном удалении от самолета.

Для вычисления вращающих моментов нужно более подробное описание системы координат: ось X направлена вдоль оси самолета от носовой части к хвостовому оперению, ось Y направлена вертикально (перпендикулярно плоскости крыльев), ось Z направлена вдоль крыльев. Тогда крен соответствует вращению самолета вокруг оси X , рыскание – вращение самолета вокруг оси Y , тангаж – вращение самолета вокруг оси Z .

В разработанной программе вращающие моменты вычисляются относительно осей вращения, проходящих через центр тяжести самолета, координаты которого (x_c, y_c, z_c) задаются в программе перед началом моделирования. В процессе расчета просматриваются все пары соседних конечно-разностных элементов, в которых один элемент принадлежит твердому телу (летательному аппарату), а второй – воздушному пространству. Произведение давления в пограничном воздушном элементе на его расстояние до центра тяжести и площадь грани дает вращающий момент. А сумма всех элементарных вращающих моментов дает полный вращающий момент летательного аппарата:

$$\begin{aligned} M_x = & \sum_{\substack{(x,y,z) - \text{воздух} \\ (x,y+\Delta y,z) - \text{тело}}} P(x,y,z)(z - z_c) \Delta x \Delta z - \\ & - \sum_{\substack{(x,y,z) - \text{воздух} \\ (x,y-\Delta y,z) - \text{тело}}} P(x,y,z)(z - z_c) \Delta x \Delta z + \\ & + \sum_{\substack{(x,y,z) - \text{воздух} \\ (x,y,z+\Delta z) - \text{тело}}} P(x,y,z)(y - y_c) \Delta x \Delta y - \\ & - \sum_{\substack{(x,y,z) - \text{воздух} \\ (x,y,z+\Delta z) - \text{тело}}} P(x,y,z)(y - y_c) \Delta x \Delta y, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} M_y = & \sum_{\substack{(x,y,z) - \text{воздух} \\ (x+\Delta x,y,z) - \text{тело}}} P(x,y,z)(z - z_c) \Delta y \Delta z - \\ & - \sum_{\substack{(x,y,z) - \text{воздух} \\ (x+\Delta x,y,z) - \text{тело}}} P(x,y,z)(z - z_c) \Delta y \Delta z + \\ & + \sum_{\substack{(x,y,z) - \text{воздух} \\ (x,y,z+\Delta z) - \text{тело}}} P(x,y,z)(x - x_c) \Delta x \Delta y - \\ & - \sum_{\substack{(x,y,z) - \text{воздух} \\ (x,y,z+\Delta z) - \text{тело}}} P(x,y,z)(x - x_c) \Delta x \Delta y, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} M_z = & \sum_{\substack{(x,y,z) - \text{воздух} \\ (x+\Delta x,y,z) - \text{тело}}} P(x,y,z)(y - y_c) \Delta y \Delta z - \\ & - \sum_{\substack{(x,y,z) - \text{воздух} \\ (x+\Delta x,y,z) - \text{тело}}} P(x,y,z)(y - y_c) \Delta y \Delta z + \\ & + \sum_{\substack{(x,y,z) - \text{воздух} \\ (x,y+\Delta y,z) - \text{тело}}} P(x,y,z)(z - z_c) \Delta x \Delta z - \\ & - \sum_{\substack{(x,y,z) - \text{воздух} \\ (x,y+\Delta y,z) - \text{тело}}} P(x,y,z)(z - z_c) \Delta x \Delta z, \end{aligned} \quad (16)$$

где M_x, M_y, M_z – моменты крена, рыскания и тангажа соответственно; $P(x,y,z)$ – давление воздуха в конечно-разностном элементе с координатами

Аэродинамические характеристики						
Угол атаки:	0		скольжения:	0		Скорость потока (м/с): 33
	Спереди (п)	Сзади (з)	Сверху (в)	Снизу (н)	Справа (пр)	Слева (л)
Давление (P):	117.829	-37.765	-166.009	-59.2153	-48.4413	-50.0187
Площадь (S):	3.25255	3.25255	19.6746	19.6746	9.90234	9.90234
Сила (F=P*S):	383.246	-122.832	-3266.17	-1165.04	-479.683	-495.302
Сила трения						
Вдоль потока (Xтр):	62.0781		Вертикально потоку (Yтр):	-0.445944		Поперек потока (Zтр): 0.00571129
Лобовое сопротивление (X=Fп+Fз+Xтр):		506.079		Подъемная сила (Y=Fв+Fн+Yтр):		2101.13
Козфф лобового сопротивления (Cx):		0.03856		Козфф подъемной силы (Cy):		0.1601
Козфф боковой силы (Cz):		-0.00119		Аэродинамическое качество (Y/X):		4.152
Координаты центра масс: X: -5.5 Y: -2.85 Z: 4.837 Размах крыла(м): 4.834						
Моменты						
Крен		Рыскание		Тангаж		
давления:	(Mpx): 26.2444	(Mpy): -56.3368	(Mpz): -507.118			
трения:	(Mvx): -0.01214	(Mvy): 0.586255	(Mvz): -5.09221			
Сумм. момент:	(Mx): 26.2323	(My): -55.7505	(Mz): -512.21			
Козффициент момента:	(mx): 0.000413	(my): -0.00087	(mz): -0.00807			
Форм. файл			OK			

Рис. 4. Панель результатов расчета аэродинамических характеристик программой «АэроПро-1»

натами (x, y, z) ; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – шаг конечно-разностной сетки.

На основании полученных моментов вычислялись соответствующие коэффициенты:

$$m_x = \frac{M_x}{S_n \rho_0 v_\infty^2 l}, \quad (17)$$

$$m_y = \frac{M_y}{S_n \rho_0 v_\infty^2 l}, \quad (18)$$

$$m_z = \frac{M_z}{S_n \rho_0 v_\infty^2 l}, \quad (19)$$

где m_x, m_y, m_z – аэродинамические коэффициенты моментов крена, рыскания и тангажа соответственно; S_n – площадь несущей поверхности (вертикальной проекции самолета), ρ_0 – нормальная плотность воздуха (на бесконечном удалении от самолета); v_∞ – скорость воздуха на бесконечном удалении от самолета; l – размах крыльев.

Пример результатов расчетов аэродинамических характеристик самолета программой «АэроПро-1» представлен на рис. 4.

Точность расчетов программы оценивалась путем моделирования и сравнения основных аэродинамических характеристик крыльев типовых профилей (лобовое сопротивление и подъемная сила) с известными данными [6] по результатам продувки этих крыльев в аэродинамических трубах. Это сравнение показало, что разработанная компьютерная модель количественно и качественно хорошо имитирует реальное поведение крыльев на углах атаки до 12° . Погрешность определения лобового сопротивления не превышает 13%, а погрешность определения подъемной силы не превышает 5%. Однако, на больших углах атаки ($>12^\circ$), соответствующих срыву воздушного потока с обтекаемой поверхности, наблюдается значительное несоответствие с натурными экспериментами.

Литература

1. **Гарбарук А. В.** Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебное пособие / А. В. Гарбарук, М. Х. Стрелец, М. Л. Шур – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 88 с.
2. **Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р.** Вычислительная гидромеханика и теплообмен/ В 2х т., т. 2: [Пер. с англ.]. – М.: Мир., 1990.
3. **Шлихтинг Г.** Теория пограничного слоя, пер. с нем., М.: Наука, 1974. – 711 с.
4. **Белов И. А., Исаев С. А.** Моделирование турбулентных течений: Учебное пособие / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2001. 108 с.
5. **Микеладзе В. Г., Титов В. М.** Основные геометрические и аэродинамические характеристики самолетов и ракет: Справочник. – М.: Машиностроение, 1982. – 149 с.

УДК 621.396

М. М. КАСПЕРОВИЧ, В. А. КОНДРАТЕНОК, Белорусский национальный технический университет, Военная академия Республики Беларусь

РЕЗУЛЬТАТЫ КРАТКОГО СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВЛИЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ НА СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ СИГНАЛЫ X-ДИАПАЗОНА

Для формирования дальностного портрета при использовании сверхширокополосного линейно частотно-модулированного сигнала в радиолокационных станциях необходимо учитывать все искажения электромагнитной волны на радиотрассе. При наблюдении за околосемными объектами сигнал проходит через ионосферу. Электромагнитная волна в ней будет подвергаться нелинейным искажениям, которые изменят временную структуру сигнала. Это приводит к возникновению ошибки по дальности. Для её компенсации нужна математическая модель искажений сигнала в ионосфере.

For range portrait formation at usage ultrabroadband linearly frequency-modulated signal in radar it is necessary to consider all distortions of an electromagnetic wave on a radio route. At observation over circumterrestrial objects the signal transits through an ionosphere. The electromagnetic wave in it will be exposed to non-linearity distortions, which transform of signal time structure. It leads to distance error origin. For its compensating it is necessary to use the mathematical model of signal distortions in an ionosphere.

Введение

Ионосфера представляет собой плазму, подмагниченную магнитным полем Земли. Его напряженность составляет около 40 А/м в средних геомагнитных широтах. Диэлектрическая проницаемость в ионосфере носит тензорный характер [1, 2], который зависит от плазменной частоты ионосферы f_{in} , эффективной частоты соударений $\nu_{эф}$, рабочей частоты f_0 и угла распространения электромагнитной волны (ЭМВ) относительно линий магнитного поля Земли. Все перечисленные параметры изменяются в пространстве. Поэтому ионосфера – анизотропная диспергирующая неоднородная среда. Следовательно ЭМВ в ней будет подвергаться нелинейным искажениям, которые будут изменять временную структуру сигнала. При обзоре радиолокационными станциями (РЛС) околосемного пространства возникает необходимость составления дальностного портрета исследуемого объекта, что требует от РЛС высокой точности. Поэтому необходимо в полном объеме учитывать ионосферные искажения.

В сантиметровом диапазоне длин волн искажения ЭМВ в ионосфере малы, что позволяет при расчетах использовать упрощенные

выражения [3]. В работе представлены две математические модели расчета искажений сверхширокополосного линейно частотно-модулированного (ЛЧМ) сигнала в ионосфере (учитывающей все воздействия ионосферы на ЭМВ и с применением упрощенных выражений) и проведен их сравнительный анализ.

1. Диэлектрическая проницаемость и показатель преломления ионосферы

На электроны в плазме действует сила Лоренца [4]:

$$\mathbf{F} = e\mathbf{E} + \frac{e}{c}[\mathbf{v}_e\mathbf{H}], \quad (1)$$

где \mathbf{H} – постоянное магнитное поле (действие магнитного поля радиоволны здесь пренебрегаем); \mathbf{E} – электрическое поле; c – скорость света в вакууме; e – заряд электрона, \mathbf{v}_e – его скорость.

Следовательно, в отсутствие трения уравнение для скорости \mathbf{v}_e имеет вид:

$$m \frac{d\mathbf{v}_e}{dt} = e\mathbf{E} + \frac{e}{c}[\mathbf{v}_e\mathbf{H}]. \quad (2)$$

Трение обусловлено соударениями электронов с другими частицами: молекулами, ионами (соударения между электронами не меняют полного импульса электронов, т. е. не меняют средней скорости \mathbf{v}_e).

Под влиянием соударений средняя скорость v_e уменьшается. Если $v_{эф}$ – частота соударений, то обусловленная соударениями сила трения между электронами и частицами сорта α , движущимися со средней скоростью v_α , есть $F_{тр} = -mv_{эф\alpha}(v_e - v_\alpha)$ и выражение (2) принимает вид:

$$m \frac{dv_e}{dt} = -e\mathbf{E} - \frac{e}{c}[\mathbf{v}_e \mathbf{H}] - \sum_{\alpha} mv_{эф\alpha}(v_e - v_\alpha), \quad (3)$$

где $v_{эф\alpha}$ – частота соударений электронов с частицами сорта α (молекулами, ионами); m – масса электрона.

При разных соударениях электрона с тяжелыми частицами изменение импульса различно, так как различны параметры удара и электроны имеют распределение по скоростям. Поэтому частоты соударений $v_{эф\alpha}$ представляют собой некоторые средние, эффективные величины. В очень широком классе условий можно считать, что частоты $v_{эф\alpha}$ не зависят от v_e , а зависят лишь от эффективной температуры электронов T_e [5]. Причина этого в том, что как в слабом, так и в сильном электрическом поле средняя скорость направленного движения электронов оказывается много меньше, чем их тепловая (хаотическая) скорость. Поэтому и частота столкновений зависит лишь от хаотической скорости, т. е. от эффективной температуры электронов.

Рассмотрим вначале случай изотропной плазмы ($H = 0$). В переменном однородном электрическом поле $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{-i\omega t}$ из (3) получаем:

$$\mathbf{v}_e = -\frac{e\mathbf{E} v_{эф\alpha} + i\omega_0}{m v_{эф\alpha}^2 + \omega_0^2}. \quad (4)$$

Тогда полный электронный ток в плазме [5]:

$$\mathbf{j} = \frac{e^2 n \mathbf{E} v_{эф\alpha} + i\omega_0}{m v_{эф\alpha}^2 + \omega_0^2}. \quad (5)$$

В электродинамике используются диэлектрическая проницаемость ϵ_n и проводимость σ_n :

$$\mathbf{j} = (-i\omega_0 \frac{\epsilon_n - 1}{4\pi} + \sigma_n) \mathbf{E} = \frac{-i\omega_0}{4\pi} (\epsilon'_n - 1) \mathbf{E}, \quad (6)$$

где $\epsilon'_n = \epsilon_n + i \frac{4\pi\sigma_n}{\omega_0}$.

Сравнивая (5) и (6), находим:

$$\epsilon_n = 1 - \frac{4\pi e^2 N_e}{m(\omega_0^2 + v_{эф\alpha}^2)}; \quad \sigma_n = \frac{e^2 N_e v_{эф\alpha}}{m(\omega_0^2 + v_{эф\alpha}^2)}, \quad (7)$$

где N_e – концентрация электронов.

При наличии магнитного поля плазма становится анизотропной. Проводимость и диэлектрическая проницаемость в этом случае являются тензорами. Полный ток в анизотропной среде определен выражением:

$$\mathbf{j}_s = \sum_k \left[-\frac{i\omega_0}{4\pi} (\epsilon_{sk} - \delta_{sk}) + \sigma_{sk} \right] E_k = -\frac{i\omega_0}{4\pi} \sum_k (\epsilon'_{sk} - \delta_{sk}) E_k, \quad (8)$$

где ϵ_{sk} , σ_{sk} – компоненты тензоров $\hat{\epsilon}_n$ и $\hat{\sigma}_n$; δ_{sk} – единичный тензор: $\delta_{sk} = 1$, если $s = k$, и $\delta_{sk} = 0$, если $s \neq k$.

Скорость \mathbf{v}_e в поле $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{-i\omega t}$, определенная из выражения (3), имеет в этом случае вид:

$$\mathbf{v}_e = -\frac{e}{m[\Omega_e^2 + (-i\omega_0 + v_{эф\alpha})^2]} \times \left\{ \mathbf{E}(-i\omega_0 + v_{эф\alpha}) + \frac{\Omega_e^2 \mathbf{H}(\mathbf{E}\mathbf{H})}{H^2(-i\omega_0 + v_{эф\alpha})} - \Omega_e \frac{[\mathbf{E}\mathbf{H}]}{H} \right\}, \quad (9)$$

где $\Omega_e = eH / mc$ – гиромагнитная частота.

Для упрощения описания рассматривалось только взаимодействие электронов с частицами сорта α . Однако все приведенные формулы справедливы и для ионов атомов, и для молекул.

Плазменная частота частицы сорта α определяется по формуле:

$$\omega_a = \sqrt{\frac{4\pi n_a e^2}{m_a}}. \quad (10)$$

Подставляя выражения (9) и (10) в соотношение (7), принимая, что $\omega'_a = \omega_0 + i v_{эф\alpha}$, находим компоненты тензора $\hat{\epsilon}$. Выбирая за ось z направление \mathbf{H} , получим [4]:

$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon & ig & 0 \\ -ig & \epsilon & 0 \\ 0 & 0 & \eta \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где $\epsilon = 1 - \sum_{\alpha} \frac{\omega_{\alpha}^2 \omega'_{\alpha}}{\omega_0(\omega_{\alpha}^2 - \Omega_{\alpha}^2)}$ – диэлектрическая проницаемость вдоль распространения ЭМВ в плоскости, перпендикулярной \mathbf{H} ;

$g = \frac{\omega_e^2 \Omega_e}{\omega_0(\omega_e^2 - \Omega_e^2)} - \sum_{\alpha \neq e} \frac{\omega_{\alpha}^2 \Omega_{\alpha}}{\omega_0(\omega_{\alpha}^2 - \Omega_{\alpha}^2)}$ – диэлек-

трическая проницаемость в направлении, перпендикулярном относительно \mathbf{E} и \mathbf{H} ;

$\eta = 1 - \sum_{\alpha} \frac{\omega_{\alpha}^2}{\omega_0 \omega'_{\alpha}}$ – продольная диэлектрическая проницаемость (вдоль \mathbf{H}).

Суммирование ведется по всем сортам заряженных частиц.

Для системы координат с осью z , повернутой на угол θ относительно магнитного поля тензор диэлектрической проницаемости будет иметь вид:

$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon & ig \cos \theta & -ig \sin \theta \\ -ig \cos \theta & \eta - (\eta - \epsilon) \cos^2 \theta & (\eta - \epsilon) \sin \theta \cos \theta \\ ig \sin \theta & (\eta - \epsilon) \sin \theta \cos \theta & \eta - (\eta - \epsilon) \sin^2 \theta \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Воспользовавшись биквадратным дисперсионным уравнением из [4]

$$(\epsilon \sin^2 \theta + \eta \cos^2 \theta) N^4 - [2\epsilon \eta + (\epsilon^2 - g^2 - \epsilon \eta) \sin^2 \theta] N^2 + (\epsilon^2 - g^2) \eta = 0, \quad (13)$$

найдем квадрат показателя преломления:

$$N^2 = \frac{2\epsilon \eta + (\epsilon^2 - g^2 - \epsilon \eta) \sin^2 \theta}{2\epsilon \sin^2 \theta + 2\eta \cos^2 \theta} \pm \frac{[4\eta^2 g^2 \cos^2 \theta + (\epsilon^2 - g^2 - \epsilon \eta)^2 \sin^4 \theta]^{1/2}}{2\epsilon \sin^2 \theta + 2\eta \cos^2 \theta}. \quad (14)$$

Получено два значения N^2 , что означает возможность существования двух волн с двумя различными скоростями распространения. В выражении (14) знаку плюс соответствует левополяризованная волна, знаку минус – правополяризованная. Кроме того, значение N – комплексное, где вещественная часть характеризует условия преломления и отражения, а мнимая – поглощение ЭМВ.

Групповая скорость в среде рассчитывается исходя из формулы [3]:

$$u_{гр} = c \operatorname{Re}(N). \quad (15)$$

Тогда групповое запаздывание составит:

$$t_{гр} = \sum_i \frac{\Delta r_i}{(u_{гр})_i}, \quad (16)$$

где Δr_i – длина i -го отрезка пути, который ЭМВ прошла с групповой скоростью $(u_{гр})_i$.

Следовательно, групповое запаздывание $t_{гр}$ зависит от концентрации в ионосфере элек-

тронов, ионов и нейтральных частиц, их температуры, частоты сигнала и угла распространения ЭМВ относительно линий магнитного поля Земли. В свою очередь запаздывание вносит искажения во временную структуру сигнала, что приводит к ошибке по дальности в РЛС.

2. Описание математической модели без приближения

Математическая модель без приближения выполнена на основании выражений, приведенных выше. Исходными данными для расчетов являются: распределение концентрации электронов, ионов и нейтральных частиц по высотам, их температуры и массы (рассматривается дневная ионосфера в летний период при умеренной солнечной активности [6]).

Частоты соударения различных сортов частиц находятся по следующим соотношениям:

– электроны с нейтральными частицами:

$$v_{em} = \frac{8}{3} \sqrt{\frac{2T_e}{\pi m}} \pi a^2 N_m, \quad (17.1)$$

где a – радиус нейтральной частицы; N_m – концентрация нейтральных частиц;

– электроны с ионами:

$$v_{ei} = \frac{5,5 N_i}{T_e^{3/2}} \ln \frac{220 T_e}{N_i^{1/3}}, \quad (17.2)$$

где N_i – концентрация ионов;

– ионы с нейтральными частицами одного сорта:

$$v_{im} = \beta_{im}^0 (T_i + T_m)^{1/2} N_m, \quad (17.3)$$

– ионы с нейтральными частицами разных сортов:

$$v_{im} = \beta_{im} N_m, \quad (17.4)$$

где коэффициенты β_{im}^0 и β_{im} характеризуют различные виды взаимодействия и перезарядки ионов и нейтральных частиц.

Подробный вывод формул (17) и значение коэффициентов β_{im}^0 и β_{im} представлены в [5].

Как известно [7], основной вклад в искажения ЭМВ вносят соударения электронов. На рис. 1 представлены зависимости концентрации частиц (электронов, ионов, нейтральных молекул и атомов) и частот соударения (электронов с нейтральными частицами, с ионами и суммарная эффективная частота) от высоты.

Как видно из рис. 1, на высотах до 150 км (на уровне слоя D) преобладают электрон-ней-

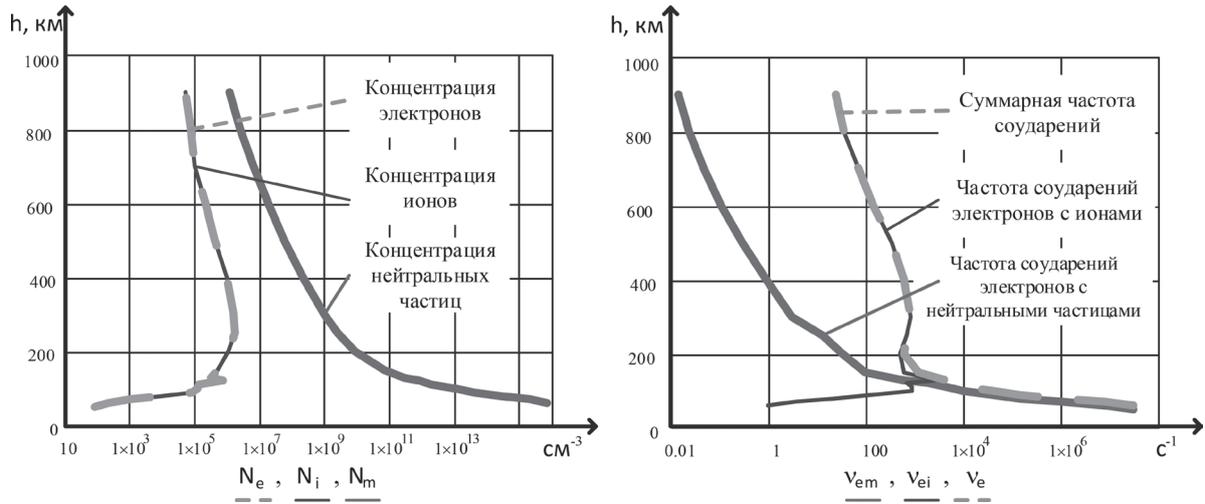


Рис. 1. Концентрация частиц в ионосфере и эффективная частота соударений электронов

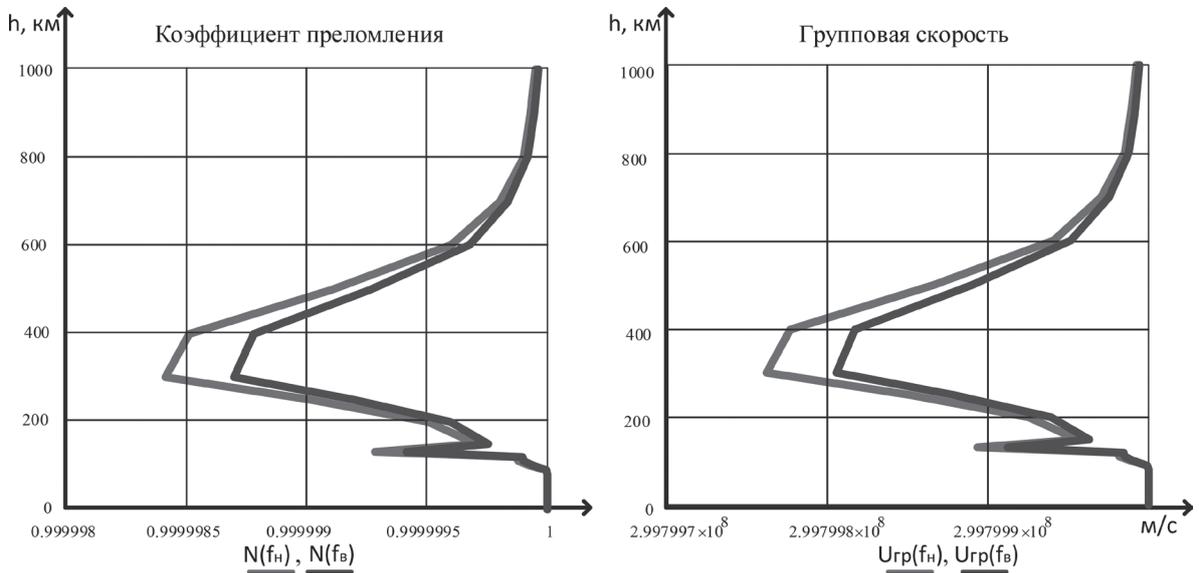


Рис. 2. Показатели преломления и соответствующие им групповые скорости

тральные соударения, выше – электрон-ионные, что определяется степенью ионизации плазмы.

Зависимости вещественных частей показателей преломления и соответствующие им групповые скорости сигналов на частотах $f_n = 9,5$ ГГц и $f_b = 10,5$ ГГц, для состояния ионосферы, описанного выше, представлены на рис. 2.

Из рис. 1 и 2 видно, что при увеличении концентрации электронов групповая скорость падает, а при увеличении частоты ЭМВ – возрастает.

В математической модели не учитывается изменение температуры плазмы под воздействием ЭМВ, так как в рассматривается только СВЧ диапазон, а при $f_0 \gg v_{э\phi}$ температура электрона не может существенно измениться

за время $1/f_0$, в течение которого изменяется электрическое поле [5].

3. Описание математической модели по приближенным формулам

Относительная диэлектрическая проницаемость ионизированного газа определяется выражением (7). Для большинства диапазонов радиоволн частотой соударений можно пренебречь $\omega^2 \gg v_{э\phi}^2$ [3, 8] и записать выражение (7) в упрощенном виде:

$$\epsilon_{и} \approx 1 - \frac{4\pi N_e e^2}{m\omega^2}. \tag{18}$$

Учитывая выражение (10):

$$\epsilon_{и} \approx 1 - \frac{\omega_{и}^2}{\omega^2} = 1 - \frac{f_{и}^2}{f^2}, \tag{19}$$

где $f_{\text{и}}$ плазменная частота электронов.

Если учесть, что $m = 9,109 \cdot 10^{-31}$ кг; $e = -1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл; $\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, то $f_{\text{и}} \approx \sqrt{80,8 N_e}$.

Для электронных концентраций $N_e = 10^3 \dots 10^6$ см $^{-3}$ ($N_e = 10^9 \dots 10^{12}$ м $^{-3}$) плазменная частота $f_{\text{и}} \approx 9\sqrt{N_e}$ изменяется в пределах 0,3...9 МГц.

Если учесть, что показатель преломления ионосферы $N = \sqrt{\varepsilon_{\text{и}}} = \frac{v_{\text{ф}}}{c}$, то фазовая скорость волны в ионосфере при $f \gg f_{\text{и}}$ определяется следующим выражением:

$$v_{\text{ф}} \approx \frac{c}{1 - 40,3 N_e / f^2} \approx c \left(1 + 40,3 N_e / f^2 \right). \quad (20)$$

Согласно (20) для $f \gg f_{\text{и}}$ фазовое запаздывание составит [3]:

$$\psi = 2\pi f \sum_i \frac{\Delta r_i}{(v_{\text{ф}})_i} \approx \frac{2\pi}{c} \left(f r - \frac{40,3 (N_e)_{\text{инт}}}{f} \right), \quad (21)$$

где $(N_e)_{\text{инт}} = \sum_i (N_e)_i \Delta r_i$ – число электронов на пути распространения в изогнутом столбе площадью 1 м 2 .

Групповое запаздывание огибающей узкополосного колебания $t_{\text{гр}} = (2\pi)^{-1} (d\psi/df)_0$ с несущей $f = f_0$ находится из (21) как

$$t_{\text{гр}}(f) = \frac{r}{c} + \Delta t_{\text{гр}}(f) \approx \frac{r}{c} + 40,3 \frac{(N_e)_{\text{инт}}}{c f^2}. \quad (22)$$

Таким образом, для математической модели по приближенным формулам исходными данными является только распределение по высотам концентрации электронов. Для сравнения моделей оно взято такое же, что и для «полной» математической модели.

4. Результаты сравнительного анализа математических моделей

При сравнительном анализе двух математических моделей использовался ЛЧМ сигнал с девиацией частоты $\Delta f_{\text{м}} = 1$ ГГц на средней частоте $f_0 = 10$ ГГц и длительностью импульса $T_0 = 1$ мкс.

Искажения сигнала учитываются в его временной структуре, причем для каждой «оцениваемой» частоты время запаздывания $t_{\text{гр}i}$ вносимое ионосферой, вычисляется по двум математическим моделям. В конечном итоге закон модуляции для искаженного сигнала имеет вид:

$$U_{\text{искаж}}(t - t_{\text{гр}}) = \begin{cases} \exp \left\{ j\pi \frac{\Delta f_{\text{м}}}{T_0} (t_i - t_{\text{гр}i})^2 \right\}, & \text{если } |t - t_{\text{гр}}| \leq \frac{T_0}{2}, \\ 0, & \text{если } |t - t_{\text{гр}}| > \frac{T_0}{2}. \end{cases} \quad (23)$$

Под неискаженным сигналам понимается:

$$U_{\text{неиск}}(t - t_{\text{гр}}) = \begin{cases} \exp \left\{ j\pi \frac{\Delta f_{\text{м}}}{T_0} (t_i - t_{\text{гр}0})^2 \right\}, & \text{если } |t - t_{\text{гр}}| \leq \frac{T_0}{2}, \\ 0, & \text{если } |t - t_{\text{гр}}| > \frac{T_0}{2}, \end{cases} \quad (24)$$

где $t_{\text{гр}0}$ – запаздывание для первой группы частот (разницу времени запаздывания для различных частот не учитывали).

Ионосфера рассматривается до высоты 1000 км, так как здесь сконцентрирована основная масса электронов [6, 9], что подтверждается рис. 1, следовательно, практически все искажения ЭМВ ионосферой происходят в данных пределах. При минимальном поднятии антенны ($\theta = 0$) с учетом изогнутости слоев атмосферы и без учета рефракции максимальное расстояние до исследуемого объекта составляет около 3900 км.

Для сравнения ошибки по дальности за счет искажений в ионосфере, которые определены по разным математическим моделям, сравним сигналы с выхода оптимального фильтра для неискаженного сигнала после квадратурного детектора. На рис. 3 для наглядности ось времени представлена эквивалентным расстоянием до цели. Красным цветом изображен неискаженный сигнал, зеленым и синим – искаженные, где $t_{\text{гр}i}$ определены по полной и упрощенной моделях соответственно.

Как видно из рис. 3, ошибка по дальности относительно неискаженного сигнала, где искажения ионосферы не учтены, при использовании «полной» математической модели составляет порядка 20 см, а для упрощенной – 15 см, т. е. относительная ошибка между двумя моделями составляет около 25%, что может быть недопустимо при составлении дальностного портрета цели.

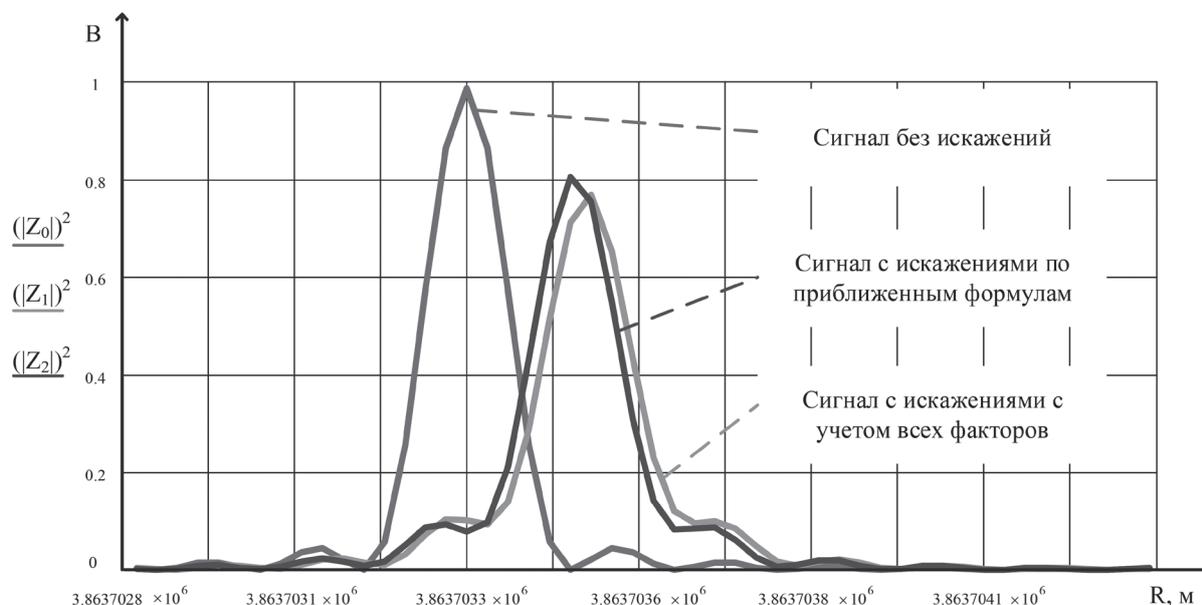


Рис. 3. Результаты сравнения математических моделей

Заключение

В современных РЛС, работающих по объектам в околоземном пространстве, точность определения дальности может составлять доли метров. При этом ошибка в 5 см может оказаться достаточно существенной (к примеру, для составления дальностных портретов объектов с целью их дальнейшего распознавания). С одной стороны, «полная» математическая модель может учитывать затухание ЭМВ на радиотрассе, рефракционный угол

для каждой групповой частоты и т. д., а, следовательно, точную высоту цели и ошибку по углу места, т. е. ее потенциальные возможности шире «упрощенной». С другой стороны, вычисления по «упрощенной» модели ЭВМ производит в среднем в 4 раза быстрее. В связи с этим целью дальнейших исследований планируется определить решающее правило по выбору той или иной модели ионосферных искажений в алгоритмах обработки информации РЛС.

Литература

1. Петров Б. М. Электродинамика и распространение радиоволн – 2-е издание. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007, 558 с.
2. Рожанский В. А. Теория плазмы: Уч. пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2012, 320 с.
3. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория. Справочник. Под ред. Я. Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007, 512 с.
4. Брюнелли Б. Е., Намгладзе А. А. Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988, 528 с.
5. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Монография. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1973, 272 с.
6. Nathan Blaunstein, Eugeniu Plohotniuc. Ionosphere and applied aspects of radio communication and radar. – CRC Press, 2008, 577 p.
7. Гершман Б. Н., Ерухимов Л. М., Яшин Ю. Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984, 392 с.
8. Budden K. G. Radio waves in the ionosphere. The mathematical theory of the reflection of radio waves from stratified ionised layers. – Cambridge at the university press, 1961, 542p.
9. Яковлев О. И., Якубов В. П., Урядов В. П., Павельев А. Г. Распространение радиоволн: Учебник под ред. О. И. Яковлева. – М.: ЛЕН АНД, 2009, 496 с.

УДК 004.9.005.53

Ю. А. ШПУРГАЛОВА, М. Ю. ШПУРГАЛОВА, Белорусский национальный технический университет

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ДРОБЛЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Установлены взаимозависимости параметров характеризующих процесс дробления горных пород и разработана методика совместной оптимизации вышеназванных параметров. Даны рекомендации к применению разработанного алгоритма на производстве.

Set of parameters characterizing the process of interdependence rock crushing and the technique of joint optimization of the above parameters. Recommendations for use of the algorithm in the workplace.

Введение

Процесс дробления является одним из главных и энергоемких процессов при подготовке горной руды к обогащению. Характеристики материала после дробления сложным образом зависят от характеристик поступающей на дробление руды и от параметров, характеризующих процесс дробления (регулируемых параметров дробильных установок). Современная технология обогащения руд требует оптимизировать параметры процесса дробления горных пород таким образом, чтобы получить дробленую руду требуемого гранулометрического состава с минимальными затратами, при одновременном выполнении ряда условий и ограничений, накладываемых требованиями техники безопасности и охраны окружающей среды.

Разработанная методика решает актуальную научную задачу установления взаимозависимости параметров характеризующих процесс дробления (характеристики руды поступающей на дробление и руды после дробления, энергозатраты на процесс дробления и другие виды затрат, необходимые для обеспечения технологического процесса на должном техническом уровне, технологические настройки дробильного оборудования) для совместной оптимизации всех вышеназванных параметров.

Постановка задачи

Вышеназванная задача более детально формулируется следующим образом: по транспортерной ленте на дробильную установку по-

ступает руда. Количество руды, поступающее с транспортерной ленты в дробилку за цикл дробления назовем загрузкой. Загрузка руды, обороты двигателя дробилки, зазор между молотками и брусом дробилки, положение подвесной решетки, положение выдвинутой решетки регулируется. Поэтому соответствующие им параметры, описывающие процесс дробления, и являются переменным параметром задачи.

Требуется, таким образом, подобрать регулируемые параметры процесса дробления горной породы (имеющей конкретные физико-химические свойства), чтобы обеспечить содержание товарной (целевой) фракции $d_{+i,-j}$ (размерами от i до j мм) в продукте измельчения было максимальным, содержания мелкого класса d_{-i} (меньше 1 мм) и содержания крупного класса d_{+j} не превышало соответствующих норм регламента, при этом энергозатраты на процесс дробления были минимальными, а также был минимальным ущерб окружающей среде, наносимый данным производственным процессом.

Таким образом, нам необходимо добиться не только минимума энергозатрат, но и получить нужный грансостав дробленого продукта.

Следующей процедурой (действием) предложенной методики является обоснование критериев, условий и ограничений оптимизационной модели.

Из вышеизложенной постановки задачи следует, что для обеспечения требуемого грансостава руды и оптимизации нескольких пока-

зателей технологического процесса дробления горных пород, задача должна включать в себя несколько критериев, наглядно отображающих основные параметры технологического процесса. Другими словами, оптимизационная задача должна формулироваться, как многокритериальная. Только при такой формулировке и формализации оптимизационной задачи она будет *наглядно отражать физический смысл и технологию решаемой практической проблемы, а также* обеспечит требуемые (квазиоптимальные) технико-экономические параметры процесса дробления. Не требует доказательства утверждение о том, что все имеющие практическое значение оптимизационные задачи горного производства являются многокритериальными. Вместе с тем, многие такие задачи формализуются, как однокритериальные. Это объясняется тем, что при разработке алгоритма численного решения многокритериальных задач, последние, как правило, сводятся к однокритериальным. Вместе с тем, многокритериальные задачи по своей сути (формулировке, формализации и полученным с их помощью результатам) существенным образом отличаются от однокритериальных оптимизационных задач. Поэтому в данной работе предложен метод решения задач оптимизации параметров процесса дробления горных пород, основанный на решении многокритериальных задач.

Выбор и формализация критериев

Из анализа вышеизложенного следует, что для обеспечения требуемого грансостава руды в качестве первого критерия и соответствующей целевой функции разрабатываемой модели следует выбрать требования максимума товарного состава дробленой руды $d_{+1,-5} \rightarrow \max$.

В качестве второго критерия и соответствующей целевой функции выбираем минимум удельных энергозатрат на процесс дробления (удельная потребляемая мощность дробилки), обеспечивающий требуемый грансостав руды $E_{уд} \rightarrow \min$.

В качестве третьего критерия выбираем требование минимума ущерба, наносимого производственным процессом окружающей среде $E_{ущ} \rightarrow \min$.

Аналогичным образом могут быть выбраны и другие критерии, а соответствующие им

целевые функции введены в оптимизационную модель.

Требования к грансоставу дробленой руды, заключающиеся в соответствии регламенту содержания мелкого класса d_{-1} и крупного класса d_{+5} обеспечим за счет введения в оптимизационную модель соответствующих ограничений.

В качестве первого ограничения выбираем требование удовлетворения регламенту содержания мелкого класса в дробленой руде $d_{-1} \leq d_{1\text{гр}}$.

В качестве второго ограничения выбираем требование на содержание крупного класса в дробленой руде $d_{+5} \leq d_{5\text{гр}}$.

По аналогии в формулируемую задачу могут быть включены и другие критерии условия и ограничения, актуальные в каждой конкретной практической задаче

Следующая процедура разработанной методики (после постановки задачи и выбора критериев условий и ограничений) состоит в определении существенных неизвестных переменных полностью и однозначно описывающих оптимизируемый процесс

Известно, что для численного решения оптимизационных задач большой размерности чаще всего используется метод декомпозиции или аналогичные ему подходы, состоящие в разделении неизвестных переменных на подмножества и последовательном определении подмножеств неизвестных переменных. На основании вышеизложенного возникает *гипотеза, состоящая в том, что для более наглядного использования метода декомпозиции и упрощения алгоритмов поиска неизвестных параметров оптимизационной модели, изначально, при формализации целевых функций, условий и ограничений следует предусмотреть такой их вид, который отражал бы вышеназванные подмножества оптимизируемых переменных.*

Все существенные неизвестные переменные величины могут быть условно разбиты на следующие подмножества:

- подмножество независимых неизвестных переменных;
- подмножество зависимых неизвестных переменных;
- подмножество неизвестных переменных, определять которые предполагается методом имитационного моделирования, с использова-

нием эвристического инженерного анализа оптимизируемого технологического процесса.

- подмножество неизвестных переменных величин, характеризующих руду после дробления,

- подмножество неизвестных переменных величин, характеризующих технические и экономические показатели дробильных установок, к которым относятся: параметры, характеризующие, соответственно, величину зазора между молотком и брусом дробилки, положение выдвижной и подвесной решеток дробилки и т. д., количество оборотов ротора дробилки в минуту n , величина загрузки дробилки b ; потребляемый ток двигателем дробилки, развиваемая при этом мощность двигателя, удельные энергозатраты на тонну измельченной руды, соответственно, I, W, N .

- подмножество неизвестных переменных характеризующих условия и ограничения описывающие минимизацию ущерба для окружающей среды, к которым относятся характеристики выброса в атмосферу вредных веществ, пыли и другие.

Процедура разбиения по определенным признакам множества неизвестных параметров \bar{X}_N на подмножества $\bar{X}_N^{(1)}, \bar{X}_N^{(2)}, \dots, \bar{X}_N^{(K)}$, по сути, является первым шагом применения метода декомпозиции и представляет собой сложную, самостоятельную задачу.

Следующим шагом является определение множества $\{\bar{A}\}$ постоянных (известных) параметров задачи, которые нам понадобятся для того, чтобы построить оптимизационную модель, удовлетворяющую указанным выше требованиям, и найти оптимальные значения неизвестных переменных. Для удобства формализации и численного решения задачи, представим множество известных параметров задачи $\{\bar{A}\}$ в виде совокупности L подмножеств известных параметров задачи, обладающие одинаковыми характерными для данного подмножества свойствами каждое из которых содержит, соответственно $L(1), L(2), \dots, L(l)$ элементов.

$$\bar{A} \in \{a_1, a_2, \dots, a_A\}, \quad \bar{A} = \bar{A}_L \in \{\bar{A}^{(1)}, \bar{A}^{(2)}, \dots, \bar{A}^{(L)}\},$$

где $\bar{A}^{(1)}$ – подмножество, характеризующее общие физико-механические свойства руды, неизменные для данного класса; $\bar{A}^{(2)}$ – подмножество, характеризующее показатели руды,

которые могут изменяться в зависимости от качества руды: параметры характеризующие закон распределения поступающей на дробление руды, процентное содержание KCl и нерастворимого остатка в руде и т. д.; $\bar{A}^{(3)}$ – подмножество, характеризующее режим процесса дробления, в том числе и технико-экономические показатели дробильных установок. Данные характеристики подробно описаны в работе [2]; $\bar{A}^{(4)}$ – подмножество, характеризующее значения границ изменения искомым переменных и требуемую точность Δx_i их вычисления:

$$\bar{A}^{(4)} \in \{x_{i \min}, x_{i \max}, \Delta x_i\}, \quad i \in [1, N].$$

Кроме вышеперечисленных, могут быть введены и другие подмножества известных постоянных параметров задачи.

Формализация модели процесса дробления горных пород (МПДГП)

В силу введенных обозначений, по аналогии с в предыдущими работами [1–4], формализуем (МПДГП) в виде выражения:

$$\begin{cases} F_j(\bar{X}_N^{(1)}, \bar{X}_N^{(2)}, \dots, \bar{X}_N^{(K)}, \bar{A}_L, t) \rightarrow \text{extr}, \quad j \in [1, J_{\max}] \\ \Phi_r(\bar{X}_N^{(1)}, \bar{X}_N^{(2)}, \dots, \bar{X}_N^{(K)}, \bar{A}_L, t) \leq 0, \quad r \in [1, R] \\ Q_s(\bar{X}_N^{(1)}, \bar{X}_N^{(2)}, \dots, \bar{X}_N^{(K)}, \bar{A}_L, t) = 0, \quad s \in [1, S] \\ \bar{X}_N = \bar{X}_{N,K} \in \{\bar{X}_N^{(1)}, \bar{X}_N^{(2)}, \dots, \bar{X}_N^{(K)}\} \\ x_i \in [x_{i \min}, x_{i \max}]; \quad i \in [1, N] \\ \bar{A}_L \in \{\bar{A}^{(1)}, \bar{A}^{(2)}, \dots, \bar{A}^{(L)}\} \end{cases} \quad (1)$$

где $\bar{X}_N^{(1)} \in \{x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_{K(1)}^{(1)}\}, \dots, \bar{X}_N^{(K)} \in \{x_1^{(K)}, x_2^{(K)}, \dots, x_{K(K)}^{(K)}\}$ – подмножества переменных параметров, на которые условно разбито все множество переменных \bar{X}_N .

Выражение $F_j(\bar{X}_N^{(1)}, \bar{X}_N^{(2)}, \dots, \bar{X}_N^{(K)}, \bar{A}_L, t) \rightarrow \text{extr}$ формализует достижение экстремальных значений J_{\max} критериями модели, а выражения $\Phi_r(\bar{X}_N^{(1)}, \bar{X}_N^{(2)}, \dots, \bar{X}_N^{(K)}, \bar{A}_L, t)$ и $Q_s(\bar{X}_N^{(1)}, \bar{X}_N^{(2)}, \dots, \bar{X}_N^{(K)}, \bar{A}_L, t)$, соответственно, R ограничений и S условий, которым должны удовлетворять переменные параметры модели

Следующая процедура методики заключается в построении вычислительных процедур, реализующих вычисление J_{\max} целевых функций, R ограничений и S условий, формализованных соответствующими выражениями модели (1).

Используя подходы компьютерной математики, каждая целевая функция, условие и ограничение модели могут быть представлены в виде вычислительной процедуры, реализованной с помощью специальных программных пакетов таких, как Excel, MathLab, MathCad, либо в виде специально разработанной компьютерных программ. Поэтому под формализованными в модели (1) целевыми функциями, условиями и ограничениями будем понимать соответствующие им, специально разработанные программные процедуры, переменными величинами и постоянными параметрами, которых являются вышеописанные множества \bar{X}_N и \bar{A}_L .

Существует множество различных способов формализации вышеназванных выражений. Эти способы зависят от конкретных условий решения задачи. Для построения нашей модели мы будем использовать следующие: аналитический, аналитико-экспериментальный способ, статистический, способ с использованием дифференциальных уравнений и уравнений математической физики.

Используемый в статье аналитико-экспериментальный способ основывается на следующих утверждениях. Исходя из представления функции многих переменных в виде ряда Тейлора можно заключить, что функция многих переменных может быть представлена в виде линейной суперпозиции функций одной переменной (функций одной переменной столько, сколько независимых переменных у функции многих переменных). *В тех случаях, когда имеется возможность экспериментального установления зависимости значения функции многих переменных от входящих в функцию переменных, то функция многих переменных в пределах некоторой характерной (для исследуемого процесса) точки может быть представлена в виде линейной суперпозиции аналитических функций одной переменной, аппроксимирующих графики экспериментальных измерений.* Ниже описан ряд процедур, на основании которых многокритериальная модель (1) будет сведена к однокритериальной модели.

Прежде всего, преобразуем формализованную многокритериальную задачу (1) к квазиравносильной ей однокритериальной задаче (2).

Первая процедура построения модели (2) заключается в определении подмножества близких по смыслу критериев и соответствующих им целевых функций модели (1), которые будут заменены линейной суперпозицией этих критериев с весовыми коэффициентами. Затем определённые критерии заменяются соответствующими им целевыми функциями задачи (1) на ограничения вида $F_j(\bar{X}_N^{(1)}, \bar{X}_N^{(2)}, \dots, \bar{X}_N^{(K)}, \bar{A}_L, t) \leq A - n \times \Delta A$, или $F_j(\bar{X}_N^{(1)}, \bar{X}_N^{(2)}, \dots, \bar{X}_N^{(K)}, \bar{A}_L, t) \geq B - m \times \Delta B$, где n, m переменные целые величины, характеризующие процесс итерации при численном поиске решения оптимизационной задачи. ΔA и ΔB – значения допустимых погрешностей при расчете данных критериев. После чего определяются критерии, которые будут заменены условиями задачи.

Следующая процедура заключается в формализации модели (2) с определением границ изменения критериев, ограничений и интервала допустимой погрешности при расчете данных критериев.

Следующая процедура состоит в построении алгоритма численного решения преобразованной оптимизационной задачи условно обозначенной (2). Эта процедура состоит из следующих действий:

Вначале, следует выделить подмножество независимых переменных, определять которые предполагается с использованием метода имитационного моделирования и эвристического инженерного анализа. [1] В качестве имитационной модели будет использована модель (2).

Выделение подмножества неизвестных параметров задачи, определяемых методом имитационного моделирования с использованием эвристического опыта инженера исследователя является этапом применения метода декомпозиции для численного решения задачи и позволяет уменьшить размерность решаемой задачи.

В дальнейшем, определенная таким способом часть неизвестных независимых переменных задачи (2) выступает в качестве известных параметров задачи определения оставшейся части неизвестных величин, условно обозначенной (3). Задача (3) – преобразованная задача (2), с меньшим количеством переменных, условий и ограничений. При использовании аналитико-экспериментального способа постро-

ения целевых функций, условий и ограничений модели (3) эксперимент проводится для зафиксированных значений определенной части переменных, выступающих в качестве параметров задачи.

Численное решение оптимизационной задачи, формализованной выражением (3) может быть найдено по одному из ниже описанных алгоритмов. Первый способ основывается на методе линейного программирования. Суть способа заключается в следующем. Построенная нами целевая функция модели является линейной суперпозицией других функций и при их аналитико-экспериментальном построении (а также при построении условий и ограничений модели) могут быть установлены участки ОДЗ переменных, для которых сами функции, условия и ограничения, с достаточной степенью точности, могут быть представлены в виде линейных зависимостей от их переменных величин. Из этих обстоятельств следует, что модель (3) может быть заменена несколькими моделями линейного программирования, построенными для установленных участков ОДЗ. Численная реализация этих моделей может быть эффективно выполнена с использованием специальных пакетов программ.

Второй способ основан на методе вариантов с оценкой вариантов на модели (3). Вначале формируется возможное количество вариантов решения модели (3). Формируем множество значений переменных $x_{i,m}$ по следующему алгоритму:

$$x_{i,m} = x_{i\min} + m \cdot \Delta x_i; \quad m \in [1, m(i)]; \quad i \in [1, N]$$

$$m(i) = \frac{x_{i\max} - x_{i\min}}{\Delta x_i};$$

$$x_{i,m} \in [x_{i\min}, x_{i\max}]; \quad i \in [1, N]$$

Формируем I подмножеств переменных:

$$\left\{ \left(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1m(1)} \right); \right. \\ \left. \left(x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2m(2)} \right), \dots, \left(x_{I1}, x_{I2}, \dots, x_{Im(I)} \right) \right\}.$$

Путем перестановок из элементов I подмножеств формируем $m(1) \cdot m(2) \cdot \dots \cdot m(I)$ вариантов возможных решений задачи.

Поочередно, подставляем, все сформированные варианты решений в модель выбираем подмножество неизвестных $\{x_{i,p}^{x^3}\}$, являющееся решением модели (3). Затем к получен-

ному подмножеству неизвестных добавляем подмножество неизвестных, определенных методом эвристического инженерного анализа. Полученное таким образом подмножество неизвестных $\{x_{i,p}^{x^2}\}$, будет являться первым приближением решения модели (2). Подставляем подмножество $\{x_{i,p}^{x^2}\}$ в модель (2), рассчитываем значение целевой функции модели. Если результат не устраивает, то изменяются значения переменных, определяемых с помощью инженерного эвристического анализа и решение модели (2) повторяется по описанному алгоритму.

Следующей процедурой по разработке методики является ее проверка на достоверность и адекватность получаемых с ее помощью результатов.

Адекватность и достоверность модели, отчасти обусловлена корректным применением математического аппарата при формализации модели и построении метода ее численной реализации. Кроме того, одним из реально достижимых и достаточно эффективных является способ проверки модели на конкретной практической задаче. В качестве такой практической задачи выбран процесс дробления калийной руды молотковой дробилкой СМ-170В на 4 рудоуправлении ОАО «Беларуськалий» [3].

В результате численного решения составленной для данного процесса оптимизационной модели было установлено, что при значениях регулируемых параметров, соответствующих положению подвесной решетки, когда она отведена до уровня бруса, положению подвижной решетки, когда она убрана, зазору между молотками и брусом дробилки равным 20 мм, загрузке, которая изменялась от 150 до 700 т/ч, количеству оборотов ротора дробилки 350 об/мин получен требуемый грансостав дробленой руды при квазиминимальных энергетических затратах, а именно удельной потребляемой мощности, равной приблизительно 0,3 кВт·ч/т.

Эти данные соответствуют данным полученным экспериментально. Доказательство экстремальности установленных переменных проводилось на модели с использованием имитационного эксперимента. Изменялись значения переменных в сторону увеличения или в сторону уменьшения, при этом значение удельных энергозатрат увеличивалось.

Заключение

1. Установлены взаимозависимости параметров характеризующих процесс дробления горных пород и разработана методика совместной оптимизации вышеназванных параметров.

2. Предложенная методика апробирована на конкретном технологическом процессе дроб-

ления калийных руд на 4-том РУ. ОАО «Беларуськалий».

3. Разработанная методика может быть применима и для оптимизации показателей работы других промышленных установок по обогащению горных пород.

Литература

1. **Шпургалов Ю. А.** Компьютерное моделирование принятия решений в производственных задачах: монография / Ю. А. Шпургалов. – Минск: БНТУ, 2009. – 217 с.

2. **Василевич Ю. В.** Оптимизационная модель процесса дробления калийных руд/Ю. В. Василевич, М. Ю. Шпургалова, В. В. Сапешко// Международный научно-технический сборник «Теоретическая и прикладная механика», Минск, 2013 г, вып. 28. – С. 216–218.

3. Выполнить исследования и провести опытно-промышленные испытания замкнутого цикла дробления калийной руды на 4 РУ с использованием различных типов дробилок и модернизированного грохота ГИТ-71М с целью улучшения грансостава дробленого продукта: отчет о НИР/ОАО «Белгорхимпром»; рук. В. В. Сапешко. – Минск, 2007. – 56 с. – № ГР 400. В. 2005–2006.

**ОБРАБОТКА
ИНФОРМАЦИИ
И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ**

**DATA PROCESSING
AND
DECISION-MAKING**

УДК 004;004.93

В.В. СТАРОВОЙТОВ, Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси

О ЦИФРОВОЙ РЕСТАВРАЦИИ ИСТОРИЧЕСКИХ ТЕКСТОВЫХ ДОКУМЕНТОВ

Рассматриваются основные проблемы реставрации старых текстовых документов и подходы к их решению при реставрации изображений этих документов методами информационных технологий. Документы-первоисточники при этом не подвергаются изменениям, а их цифровые копии можно модифицировать с ориентацией на различные применения и согласно разным уровням обработки.

The main problems of old text document restoration and approaches to their solution during restoration of images of these documents by methods of information technology are considered. Primary source documents are not changed, but their digital copies can be modified with orientation on different applications and according to the different levels of processing.

Введение

Традиционная реставрация старых культурных ценностей процесс очень кропотливый и медленный, например, фреску «Тайная вечеря» Леонардо да Винчи реставрировали 21 год. Главный принцип такой реставрации – не навредить оригиналу. Часто к ней прибегают, когда разрушение картины, памятника или другого объекта культурного наследия находится под угрозой утраты целостности и не позволяет его использовать и демонстрировать.

В последние годы многие национальные библиотеки и архивы переводят свой фонд в цифровое представление. Многие исторические документы (книги, чертежи, карты, рукописи и т.п.) в силу ветхости или уникальности доступны только ограниченному кругу специалистов. Их перевод в цифровое представление обеспечивает возможность доступа к ним широкому кругу читателей, причем даже дистанционно. Однако многие старые документы имеют искажения и повреждения, что затрудняет их чтение и изучение.

В проекте ГОСТ РФ «Электронные документы. Основные виды, выходные сведения, технологические характеристики» детально описывается понятие электронного документа (ЭД), как созданного программными средствами целостного электронного объекта, предназначенного для непосредственного восприятия человеком. Выделяются три вида электронных документов:

- текстовый ЭД, содержание которого составляет читаемая информация преимущественно в виде слов;

- графический ЭД, содержание которого составляет визуальное представление объектов;

- звуковой (аудио) ЭД.

По представлению данных выделяются:

- оригинальный ЭД (созданный впервые),

- копия ЭД,

- цифровая копия аналогового документа,

- трансформированный ЭД (переведённый из одной знаковой системы в другую, например, с помощью распознавания текста, синтеза речи).

В данной работе будем ориентироваться на создание графического ЭД являющегося отреставрированной цифровой копией реального документа. Основным отличием создания цифрового представления исторического документа является отсутствие цифрового оригинала, т. е. оригинальный документ создавался без участия вычислительной техники.

Электронные документы в цифровых фондах библиотек

Основные организации хранящие исторические документы – это архивы и библиотеки. Следует отметить, что во многих странах библиотеки активно формируют свой цифровой фонд. Рассмотрим основные направления цифрования текстовых документов по регионам.

В мире. В одной из самых больших библиотек мира – Библиотеке конгресса США – по данным на 2007 год было оцифровано 10% из 142 млн книг и документов. В первую очередь в электронный вид были переведены документы, датированные до 1923 года, поскольку на них отсутствуют авторские права. Ежедневно в ней сканируется от 75 до 200 документов. По подсчетам специалистов, для оцифровки всего ее фонда (142 млн. объектов) потребуется не одно десятилетие [1]. В Национальной библиотеке Франции с 1997 года реализуется проект Gallica (gallica.bnf.fr), в рамках которого отсканированы, переведены в цифровой формат и выложены в Интернет порядка 80 тысяч книг и 70 тысяч изображений. Британская национальная библиотека в 2005 году заявила о начале реализации проекта по переводу фонда в электронный вид. К 2020 году около 90% научной продукции британских ученых переведут в цифровой формат, и они будут доступны через Интернет. В марте 2005 года начала свою работу Европейская цифровая библиотека (The European Library). Европейская библиотека – это совместный некоммерческий проект 48 национальных библиотек Европы. Россию в этом проекте представляют Российская государственная и Российская национальная библиотеки. Сегодня Европейская цифровая библиотека предлагает доступ к 150 млн. документов на 35 языках, хранящихся в 48 национальных библиотеках европейских стран [2]. К сожалению Беларусь не присоединилась к этому проекту.

Наряду с национальными и континентальными проектами электронных библиотек в 2005 г. ООН учредила международный проект «Мировая цифровая библиотека» (World Digital Library). Основная идея заключалась в создании на базе сети Интернет легкодоступной коллекции сокровищ Мировой культуры, способствуя укреплению межкультурных связей и взаимопониманию. «Мировая цифровая библиотека» официально заработала в апреле 2009 года. Содержание веб-сайта, включает библиотеки и архивы со всего мира, доступно на семи языках – арабском, китайском, английском, французском, португальском, русском и испанском.

В России. Ряд библиотек России также создает и хранит электронные копии различных документов. Российский проект «Национальная электронная библиотека» (НЭБ) разраба-

тывается ведущими российскими библиотеками при поддержке Министерства культуры Российской Федерации с 2004 г. На сегодняшний день в проекте участвуют около 60 библиотек-партнеров, среди которых: Российская государственная библиотека (РГБ), Российская национальная библиотека (РНБ), Государственная публичная научно-техническая библиотека (ГПНТБ России). Общий объем электронных документов НЭБ сегодня составляет 15 миллионов страниц в электронном виде, и библиотека постоянно пополняется. Одно из направлений – старопечатные книги включает цифровые копии уникальных изданий, вышедших до 1830 г. Все документы хранятся в формате pdf.

17 декабря 2008 года Российская государственная библиотека объявила о завершении проекта по созданию электронного хранилища книг, созданного в рамках реализации концепции Национальной электронной библиотеки. Хранилище объединило редкие книги и рукописи, периодические издания и ноты, собранные со всех основных российских библиотек. В него вошли также книги Президентской библиотеки и электронной библиотеки диссертаций [3].

Основу электронной библиотеки «Земля Владимирская» составляют электронные копии редких и краеведческих изданиях из фондов библиотек региона. В электронной коллекции содержится «Банк правовых актов Владимирской губернии» для в цифровом формате. Этот ресурс, наиболее полно представляющий историю становления и развития государственности во Владимирской области со времени основания губернии в 1778 г. до конца 1990-го г. Проект реализуется с 2009 г. [4].

В Беларуси основными организациями-хранителями исторических документов являются:

- Национальный исторический архив Беларуси (НИАБ),
- Национальная библиотека Беларуси,
- Белорусский научно-исследовательского центр электронной документации.

Существует «Белорусская цифровая библиотека» (БЦБ) – частная некоммерческая интернет-библиотека Республики Беларусь. Коллекция библиотеки содержит более 100 000 публикаций и пополняется в автоматическом режиме пользователями сайта: каждый посетитель может разместить свои научные и литературные труды на сайте (<http://library.by/>).

Следует отметить что большинство ЭД хранящихся в белорусских библиотеках – это современные текстовые документы, подготовленные с помощью компьютеров и преобразованные (в основном) в формат *pdf* из других тестовых форматов с помощью графических редакторов.

Внимание архивистов в нашей стране больше сосредоточено на вопросах цифрового копирования традиционных документов, уже хранящихся в архивах. Если копирование книжной продукции направлено прежде всего на обеспечение доступа (и потому актуальна проблема авторского права), то для архивов, а также рукописных отделов библиотек первостепенную роль играет возможность обеспечить лучшую сохранность оригиналов, обычно существующих в единственном экземпляре [5]. К сожалению, работы по оцифровыванию, а тем более по цифровой реставрации исторических текстовых документов в нашей стране не выполняются.

Реставрация старых текстовых документов

Старые текстовые документы не имеют исходных цифровых форматов и чаще всего представлены оригинальными бумажными документами. По способу нанесения текста бумажные документы можно разделить на три основные группы: рукописные, машинописные, печатные. [6]. Рукопись почти полтора тысячелетия являлась единственным способом исполнения бумажных документов (II–XVI вв. н.э.). В этот период документы не только исполняли, но и копировали рукописным способом. Несколько позднее применялось факсимильное ксилографическое копирование рукописных книг (VII–VIII вв. – Китай и Япония; XV в. – Европа). В XV в. появляется буквенно-борное устройство, печатный станок и книгопечатание (1440 г.). В XVI в. рукописные книги вытесняются печатными, однако рукопись, как способ исполнения официальных документов, сохраняет свое значение до конца XIX в. В конце XIX в. появляется машинописный способ исполнения документов, играющий основную роль до конца XX века. В настоящее время основной способ создания документов – компьютерный.

Состав средств нанесения символов постоянно изменялся. До 70-х гг. XIX в. для написания текста использовали только природные ве-

щества: неорганические пигменты, органические красители растительного и животного происхождения. С конца XIX в. природные красители были заменены синтетическими. С момента появления машинописи (1887 г.) ее технология принципиально не изменилась. Машинописный текст переносился на бумажный носитель с пропитанной краской ленты (1-й экз.) или с копировальной бумаги (2–5-й экз.). Краска для лент содержала в два раза больше красителей и жидких масел, чем копировальная. Поэтому цветовая насыщенность, глубина прокрашивания бумаги, устойчивость к истиранию у текста первого экземпляра значительно выше, чем у копий.

Машинописные тексты водостойки, черные рецептуры светостойки. Цветные машинописные тексты выцветают на свету, нестойки к химическим веществам (щелочам, окислителям), расплываются в неполярных органических растворителях (толуоле, бензоле и т. п.). Краски для печати состоят в зависимости от назначения продукции из сажи, олифы, минеральных масел, каменноугольных смол. Краски глубоко проникают в бумагу, печатный текст свето- и водостоек. При действии органических растворителей может появляться ореол от вымывания смол или красителей.

В современных электрофотографических аппаратах текст наносится на бумагу с помо-

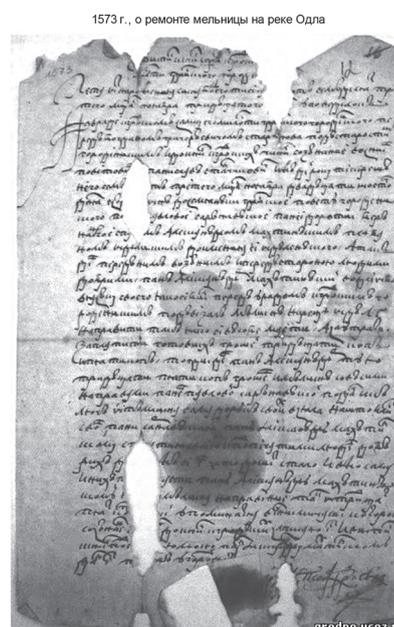


Рис. 1. Цифровое изображение белорусского документа 1730 года: неравномерный фон, отсутствуют фрагменты, имеются пятна, потертости, четкие символы, более поздние пометки

щью специального порошка (тонера) и закрепляется термическим способом. Черный тонер состоит из сажи и термопластичного полимера (идитол, полистирол и т. п.). Электрографический текст водостоек, светостоек, имеет такую же прочность к истиранию, как тушевой или машинописный текст (1-й экз.). Текст термопластичен, повреждается при нагревании, расплывается в органических растворителях.

С течением времени и вследствие не всегда удовлетворительного хранения носители таких документов подвержены старению и повреждению, а текст и графика теряют свое визуальное качество. Со временем старые документы становятся все менее доступны читателям. В Беларуси существует государственное учреждение «Центральная лаборатория микрофильмирования и реставрации документов Национального архивного фонда Республики Беларусь» (ЦЛМРД НАФ РБ). Оно занимается традиционной реставрацией документов, детали которой подробно описаны в [6].

Традиционная реставрация проводится с целью физического восстановления документов, разрушенных при старении [7]. Ее основные задачи:

- восстановление физической целостности документа,
- восстановление прочности бумажного носителя,
- устранение причин и последствий старения документа,
- устранение причин, вызывающих искаженное эстетическое восприятие документа.

Реставрационное вмешательство всегда сопряжено с опасностью повредить документ.

Виды повреждений исторических документов

Механические повреждения, для которых типичны четкие линии повреждений и отсутствие протяженных переходных зон от целого к разрушенному (обрывы, разрывы, проколы, порезы, места сгибов и т. п.). Механические повреждения не приводят к изменению химического состава и свойств объекта и устраняются способами физической реставрации (соединение разрывов, восполнение недостающих частей, долив бумажной массы и т. п.).

Повреждения насекомыми по характеру действия являются механическими. Типичным является сочетание точечных, линейных, кружевных отверстий с измельченными в труху

отдельными, чаще всего краевыми местам листов. Насекомые не выделяют химических веществ в местах повреждений и поэтому устранение этих дефектов проводится так же, как механических.

Повреждения плесневыми грибами имеют характерные внешние признаки: бумага по всему листу или крупными зонами разрушена, стала ломкой и хрупкой, побурела; зоны поражения имеют пигментные пятна различных, чаще всего оранжево-желтых и коричневых цветов; после сильного плесневения видны налеты мицелия и порошка спор; бумага в местах поражения плохо смачивается водой, кислотность ее повышена.

Повреждения химические могут быть двух видов: общие и локальные. При общем химическом поражении потеря прочности, ветхость, желтизна бумаги, выцветание текста равномерны и примерно одинаковы по всей площади листа. Такое повреждение является обычно следствием длительного темного старения, кратковременного действия тепла или света.

Для локального поражения характерны повреждения в зонах или отдельных местах. Повреждения вызываются кислотами, щелочами, солями, попавшими на бумагу случайно или вместе с наклейками, чернилами. Действие кислых газов заметнее на краях листа, имеющих повышенную хрупкость, желтизну, кислотность.

В некоторых случаях сильные химические повреждения напоминают по внешнему виду плесневые, но не имеют типичных биологических признаков – пигментации, налетов спор и мицелия.

Повреждения водой определяются по следам подмочки, размытому тексту, деформации бумаги. Часто в местах подмочки заметны следы плесневения, особенно в корешках дел. Намокание документов нередко сопровождается попаданием на бумагу грязи, различных солей.

Повреждения огнем имеют типичные внешние признаки: следы обугливания, сажевые загрязнения, побуревшая, хрупкая, рассыпающаяся бумага, обесцвеченный, поврежденный текст.

Действие разрушающих факторов – света, тепла, воды, химических веществ, плесневых грибов изменяет структуру бумаги, приводит к деструкции органических веществ документа

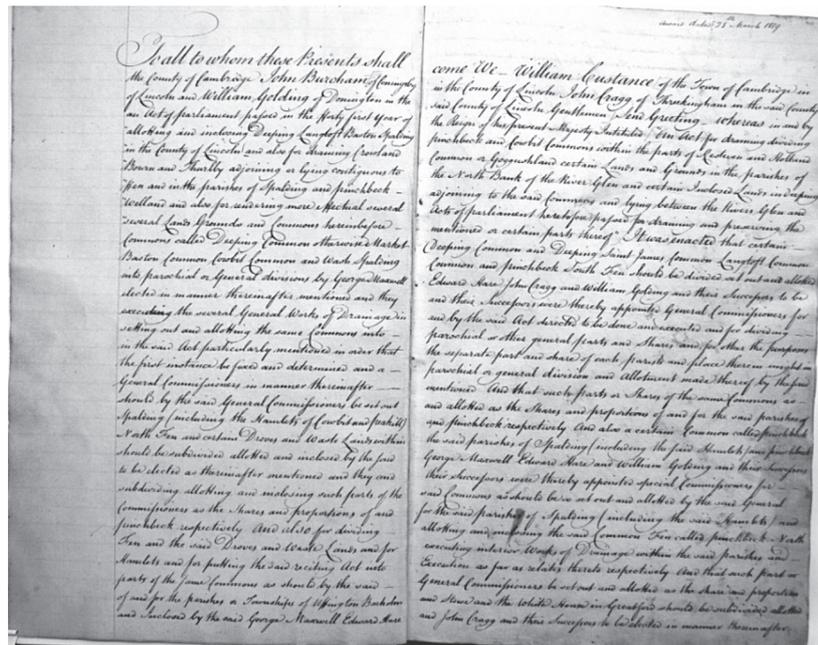


Рис. 2. Геометрическое искажение формы строк, неоднородный фон возникшие в результате оцифровывания документа, а также пятна на странице

и образованию продуктов распада. Резко уменьшается прочность бумаги, ее сопротивляемость любым воздействиям. Процессы старения в ослабленной бумаге протекают ускоренно, документы легче поражаются биологическими вредителями, не выдерживают обычных нагрузок. Выцветает и легче повреждается текст.

Можно выделить следующие дефекты бумажных текстовых архивных документов [6, 8]:

- прозрачные и непрозрачные пятна на страницах,
- загрязнение поверхности,
- царапины и надрывы страниц,
- перегибы бумаги (или другого материала-основы),
- дыры и оборванные края и углы документа,
- деформация документа (кроме перегибов),
- выцветание материала-основы, пожелтение бумаги,
- неравномерность фона,
- плесень,
- выцветание текста,
- рукописные пометки на страницах,
- штампы, печати,
- надписи, проступание с обратной стороны листа.

Традиционная реставрация проводится с целью физического восстановления или сохранения основы документов, разрушенной или измененной с течением времени.

Цифровая реставрация старых документов

Создание цифровых копий исторических документов и их цифровая реставрация позволит сделать эти документы доступными для широкого круга людей, а более качественное представление информации, которую они несут, сохранит их для будущих поколений. Некоторые методические и технические требования к оцифровке исторических документов описаны в работах [9–10], но задачи и алгоритмические детали в них не описываются.

Отметим, что производится множество специальных сканеров книг, цифрующих со скоростью 200-400 страниц в минуту. Однако для ветхих исторических документов автоматическое перелистывание не годится из-за возможности их повреждения.

Можно выделить следующие уровни цифровой обработки изображений документов:

- геометрическая коррекция (в процессе сканирования форма оригинала документа может быть искажена, рис. 2),
- яркостная коррекция (рис. 2);
- тематическая обработка первого уровня – ориентация на создание псевдо-гипертекстового документа подобно оцифрованным книгам, представленным на сайте <http://books.google.com/>; результатом является представление документа в формате «текст в графическом виде» без коррекции (рис. 3);

5. *Folgerungen aus den Capillaritätserscheinungen;*
von Albert Einstein.

Bezeichnen wir mit γ diejenige Menge mechanischer Arbeit, welche wir der Flüssigkeit zuführen müssen, um die freie Oberfläche um die Einheit zu vergrössern, so ist γ nicht etwa die gesamte Energiezunahme des Systems, wie folgender Kreisprozess lehrt. Sei eine bestimmte Flüssigkeitsmenge vorliegend von der (absoluten) Temperatur T_1 und der Oberfläche O_1 . Wir vermehren nun isothermisch die Oberfläche O_1 auf O_2 , erhöhen die Temperatur auf T_2 (bei constanter Oberfläche), vermindern dann die Oberfläche auf O_1 und kühlen dann die Flüssigkeit wieder auf T_1 ab. Nimmt man nun an, dass dem Körper ausser der ihm vermöge seiner specifischen Wärme zukommenden keine andere Wärmemenge zugeführt wird, so ist bei dem Kreisprozess die Summe der dem Körper zugeführten Wärme gleich der Summe der ihm entnommenen. Es muss also nach dem Princip von der Erhaltung der Energie auch die Summe der zugeführten mechanischen Arbeiten gleich Null sein.

Es gilt also die Gleichung:

$$(O_2 - O_1)T_1 - (O_2 - O_1)T_2 = 0 \quad \text{oder} \quad T_1 = T_2.$$

Dies widerspricht aber der Erfahrung.

Es bleibt also nichts anderes übrig als anzunehmen, dass mit der Aenderung der Oberfläche auch ein Austausch der Wärme verbunden sei, und dass der Oberfläche eine eigene specifische Wärme zukomme. Bezeichnen wir also mit U die Energie, mit S die Entropie der Oberflächeneinheit der Flüssigkeit, mit s die specifische Wärme der Oberfläche, mit w_0 die zur Bildung der Oberflächeneinheit erforderliche Wärme in mechanischem Maass, so sind die Grössen:

$$\text{und} \quad dU = s \cdot O \cdot dT + \{ \gamma + w_0 \} dO$$

$$dS = \frac{s \cdot O \cdot dT}{T} + \frac{w_0}{T} dO$$

vollständige Differentiale. Es gelten also die Gleichungen:

Первая страница статьи А. Эйнштейна
 «Следствия из явления капиллярности»

Рис. 3. Книга Google А. Эйнштейн Работы по кинетической теории, теории излучения и основам квантовой механики. М.: Наука, 1966. Текст представлен изображениями без реставрации

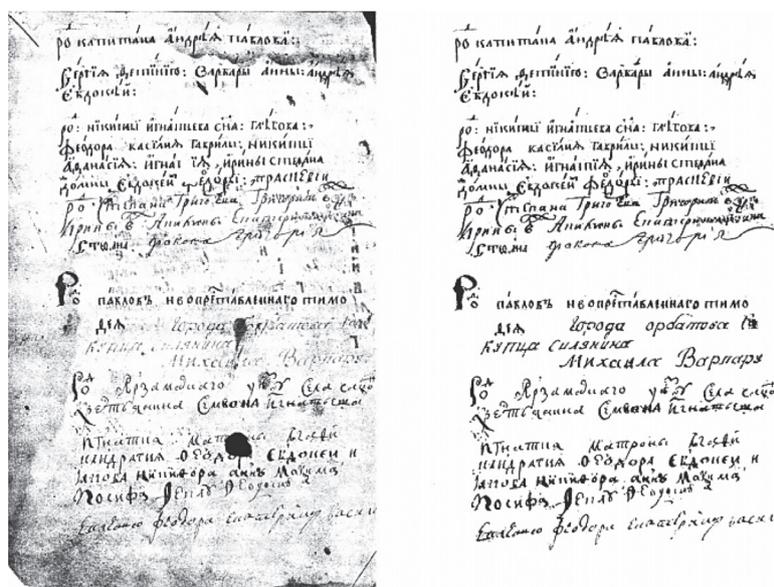


Рис 4. Пример реставрации старого текстового документа [7]: а – до реставрации; б – после реставрации

• тематическая обработка второго уровня – ориентация на визуальный анализ изображений документов (редактирование изображений, корректировка фона, улучшение изображений, выделение дефектных областей и определение

типов дефектов, исправление дефектов, форматирование документа, создание электронной книги и т. п.); результатом является изображение страницы документа или ее части (на рис. 4 приведен пример реставрации документа группой

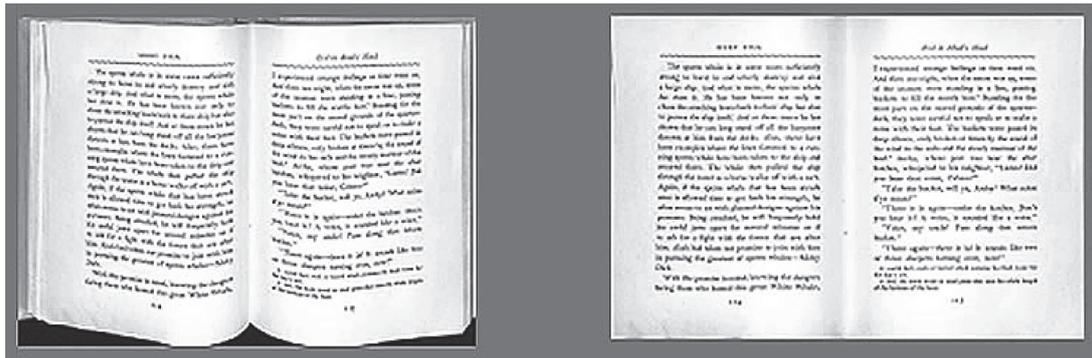


Рис 5. Пример геометрической коррекции отсканированной страницы

российских ученых, но в настоящее время они прекратили разработки в этом направлении);

- тематическая обработка третьего уровня – ориентация на автоматизированный анализ изображений документов и извлечение информации (сегментация на текст+фон+иллюстрации, подобно алгоритму DjVu), утоньшение текстовых символов для автоматического распознавания, повышение качества текста; результатом является комбинированное представление документа в виде «текст»+«изображение текста» с возможностью использования достоверного графического представления документа и работы с текстом (чтение, копирование, поиск).

Алгоритмы цифровой реставрации изображений документов можно разделить на следующие группы:

- автоматические и интерактивные,
- низкоуровневые и контекстно-ориентированные (высокоуровневые).

Рассмотрим основные задачи цифровой реставрации исторических документов:

- формирование цифрового представления документа (сканирование или фотографиярование),
- геометрическая коррекция страницы (автоматическая обрезка, исправление перекоса, поворот, выравнивание строк, см. рис. 5),
- исправление неравномерного фона,
- исправление баланса белого,
- фильтрация изображения документа,
- устранение проступающих с обратной стороны надписей,
- выравнивание яркости и контраста,
- преобразование исходного изображения документа в полутоновое и черно-белое представление,
- сегментация изображения на текстовые блоки, иллюстрации и фон,
- заполнение царапин, надрывов и дыр на цифровом представлении страницы,

- детекция пятен и дыр, формирование их маски,
- адаптивная бинаризация текста,
- усиление контраста исходного представления текста,
- формирование изображения однородного представления текстуры основы (бумаги),
- распознавание печатных символов определенного алфавита.

Заключение

В настоящее время электронные библиотеки содержат два основных типа книг: 1) книги, набранные на компьютере и сохраненные в формате *pdf* или *djvu*, 2) книги оцифрованные с помощью сканера и фотокамеры и представленные набором изображений без обработки.

Впервые в Беларуси рассматривается актуальная проблема цифровой реставрации отсканированных или сфотографированных исторически значимых текстовых документов. Показано, что задачи традиционной реставрации таких документов в основном ориентированы на физическое сохранение их носителей (в основном бумажных). При этом основным принципом является «не навреди оригиналу», т. е. носителю информации.

После оцифровки, оригинальный документ испортить невозможно, он остается в хранилище. Цифровая реставрация позволяет менять и обрабатывать электронные копии оригинальных документов без ущерба подлинникам, но с ориентацией на различные применения: обеспечить доступ к зафиксированной на них информации без визуального изменения исходного цифрового представления документа, улучшение яркостных характеристик и геометрическая коррекция представления текстовых строк, выделение исправление и дефектов, преобразование документа в форму электронной книги, формирование комбинированного

представления документа в форме «текст» + «изображение текста», совмещающего достоверное графическое представление исходного документа и возможность работы с его текстом путем копирования, индексирования, поиска.

Создание цифровых экземпляров исторических документов и старых книг позволит библиотекам и архивам создавать цифровые версии оригинальных документов и расширить круг пользователей, некоторые материалы могут быть доступны дистанционно.

Литература

1. Электронный ресурс. Крупнейшие цифровые библиотеки мира. Справка <http://ria.ru/society/20090527/172428361.html>. Дата доступа 6.04.2015.
2. Электронный ресурс. About the european library services for libraries. <http://www.theeuropeanlibrary.org/tel4/aboutus>. Дата доступа 6.04.2015.
3. Электронный ресурс. Старопечатные книги. <http://elibrary.rsl.ru/?menu=s410/elibrary/elibrary4454/elibrary44544455/&lang=ru>. Дата доступа 6.04.2015.
4. Электронный ресурс. Проекты по оцифровке Владимирской областной научной библиотеки. <http://library.vladimir.ru/proekty-po-ocifrovke-vladimirskoj-oblastnoj-nauchnoj-biblioteki.htm> Дата доступа 6.04.2015.
5. **Носевич В.** Как сберечь цифровое наследие // Архивы и справоводства. 2011. № 6 (78). С. 82–92.
6. Реставрация документов на бумажных носителях: методические рекомендации / Главархив. ВНИИДАД. – М., 1989. – 152 с.
7. **Канунова Е. Е., Орлов А. А., Садыков С. С.** Методы и алгоритмы реставрации изображений архивных текстовых документов. – М. : Мир, 2006. – 135 с.
8. **Садыков С. С., Канунова Е. Е., Варламов А. Д.** Автоматизированная реставрация изображений архивных текстовых и фотографических документов // Автоматизация и современные технологии. – 2007. – № 8. – С.10–15.
9. **Караваев В. С.** Оцифровка архивных документов: технические и технологические проблемы // Документ. Архив. История. Современность. 2014. – Вып. 14. – С. 243–257.
10. **Бокштейн И. М., Кузнецов Н. А., Мерзляков Н. С., Рубанов Л. И.** Возможности и средства цифровой реставрации архивных рукописных текстов // Информационные технологии и вычислительные системы, М.: ИВВС РАН, 1997. – № 1. – С. 1–15.

Правила для авторов

1. Общие требования

Материалы статей представляются на бумажном носителе (в двух экз.) по адресу: 220013, Минск, ул. Ф. Скорины, 25/3, корп. 20, каб. 508 (Петренко Юрий Николаевич) и в электронном виде e-mail: CA_PI@bntu.by. Телефон для справок: (017) 266 26 58.

Статья, представляемая на бумажном носителе, должна быть подписана всеми авторами. К статье прилагаются сведения об авторах: фамилия, имя, отчество полностью, домашний адрес, телефоны, адрес электронной почты, место работы, ученая степень и звание.

Статьи, поступившие в редакцию журнала, регистрируются в установленном порядке. Статьи, оформленные с нарушением приведенных правил, к рассмотрению редакцией не принимаются. Принятые статьи рецензируются. При положительной рецензии статья предлагается к опубликованию.

Редакция не принимает статьи, опубликованные ранее в других журналах или научных изданиях.

Гонорар автору за публикацию статьи не выплачивается. Материалы, присланные в редакцию, авторам не возвращаются.

2. Правила оформления статей

Объем статей (с иллюстрациями) не должен превышать:

- для оригинальной статьи – 7 страниц (не более 8 иллюстраций);
- для краткого сообщения – 3 страницы (не более 2 иллюстраций).

Статья должна быть набрана с помощью текстового редактора Microsoft Word 2007.

Параметры страницы: формат А4 (высота 29,7 см., ширина – 21 см.); отступ для левого поля и поля сверху – 25 мм, правого и нижнего – 20 мм; нумерация страниц сверху в колонтитуле, со второй страницы, с выравниванием по правому краю.

Текст набирается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт. Межстрочный интервал – полуторный. Абзацный отступ – 12 мм.

2. Индекс УДК набирается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, все прописные, выравнивание – по правому краю.

3. Фамилия и инициалы автора (авторов) в именительном падеже печатаются шрифтом TimesNewRoman, 12пт, курсив, выравнивание – по левому краю.

4. Название статьи набирается шрифтом Arial, 12 пт, жирный, все прописные, выравнивание – по центру.

5. Полное название организации (организаций), в которой работает автор (авторы) набирается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, выравнивается по центру. После названия организации пропускается две строки.

6. Аннотация на языке статьи набирается шрифтом TimesNewRoman, 10 пт, курсив, выравнивается по центру. Объем аннотации не более 8 строк, межстрочный интервал 1,15.

После аннотации пропускается одна строка.

7. Текст статьи (набирается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, с абзацем, выравнивание – по ширине) должен содержать следующие элементы:

1) введение (может содержать: краткий обзор литературы по проблеме исследования, перечисление нерешенных ранее вопросов, постановку проблемы, цель исследований). Слово «Введение» печатается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, жирный, выравнивание – по левому краю.

2) основная часть исследования (возможно деление на подразделы), включающая графики и другой иллюстративный материал (при их наличии), при этом таблицы и рисунки не должны дублировать друг друга. Название каждого подраздела статьи печатается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, жирный, выравнивание – по левому краю.

3) Заключение (формулируются основные полученные результаты с указанием их новизны, преимуществ по сравнению с аналогами). Слово «Заключение» печатается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, жирный, выравнивание – по левому краю.

8. Литература. Список литературы оформляется шрифтом TimesNewRoman, 12 пт в соответствии с Инструкцией по оформлению диссертации, автореферата и публикаций по теме диссертации, утвержденной постановлением президиума Государственного высшего аттестационного комитета Республики Беларусь 24.12.1997 № 178 (в редакции постановления ВАК Беларуси от 22.02.2006 № 2). www.edu.grsu.by/files/liter.doc.

Слово «Литература» печатается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, все прописные, выравнивание – по левому краю.

Источники должны располагаться в порядке цитирования в тексте. Порядковые номера ссылок в тексте должны быть написаны внутри квадратных скобок (например: [1], [2]). В обзорных статьях указывается не более 15 источников, во всех других – не более 7–10.

9. К статье на русском (англ.) языке должна прилагаться аннотация на английском (русском) языке. Она должна содержать: Название статьи, фамилию и инициалы автора (авторов), краткое содержание статьи не более 8 строк.

10. Оформление формул. Формулы (все символы латинского, греческого алфавитов и иные, используемые в формулах) должны быть набраны с помощью встроенного в MS Word редактора формул Equation. Латинские символы должны быть набраны курсивом, как в формулах, так и на рисунках, и в тексте, а русские и греческие – обычным текстом.

В редакторе формул должен быть установлен следующий размер символов: обычный символ – 11 пт., крупный индекс – 7 пт., мелкий индекс – 5 пт., крупный символ – 17 пт., мелкий символ – 12 пт. Формулы выравниваются по центру страницы. При необходимости делать ссылки на формулы их следует нумеровать арабскими цифрами, помещенными в круглые скобки, в порядке упоминания. Номера формул выравниваются по правому краю страницы.