

с е т е в о й н а у ч н ы й ж у р н а л ISSN 2518-1092

НАУЧНЫЙ РЕЗУЛЬТАТ

R E S E A R C H R E S U L T

Том 3 | № 2
Volume 3 | 2018

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ

INFORMATION
TECHNOLOGY

Сайт журнала:
rrinformation.ru

сетевой научный рецензируемый журнал
online scholarly peer-reviewed journal





Том 3, № 2. 2018

СЕТЕВОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с 2016 г.

ISSN 2518-1092



Volume 3, № 2. 2018

ONLINESCHOLARLYPEER-REVIEWEDJOURNAL

First published online: 2016

ISSN 2518-1092

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР: **Черноморец А.А.**, доктор технических наук, профессор кафедры прикладной информатики и информационных технологий Белгородского государственного национального исследовательского университета.

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ: **Болгова Е.В.**, старший преподаватель кафедры прикладной информатики и информационных технологий Белгородского государственного национального исследовательского университета.

РЕДАКТОР АНГЛИЙСКИХ ТЕКСТОВ СЕРИИ: **Ляшенко И.В.**, кандидат филологических наук, доцент

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

Басов О.О., доктор технических наук (Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), г. Санкт-Петербурга)

Белов С.П., доктор технических наук, профессор (Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород)

Волчков В.П., доктор технических наук, профессор (Московский технический университет связи и информатики, г. Москва)

Дмитриенко В.Д., доктор технических наук, профессор (Харьковский национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков, Украина)

Иващук О.А., доктор технических наук, профессор (Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород)

Корсунов Н.И., заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор (Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород)

Коськин А.В., доктор технических наук, профессор (Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, г. Орел)

Ломазов В.А., доктор физико-математических наук, профессор (Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина, г. Белгород)

Маторин С.И., доктор технических наук, профессор (Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород)

Рубанов В.Г., заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор (Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород)

EDITORIAL TEAM:

EDITOR-IN-CHIEF: **Andrey A. Chernomorets**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Belgorod State National Research University

EXECUTIVE SECRETARY: **Evgeniya V. Bolgova**, Senior Lecturer, Belgorod State National Research University

ENGLISH TEXT EDITOR: **Igor V. Lyashenko**, Ph.D. in Philology, Associate Professor

EDITORIAL BOARD:

Oleg O. Basov, Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

Sergey P. Belov, Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

Valery P. Volchikov, Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

Valery D. Dmitrienko, Doctor of Technical Sciences, Professor (Ukraine)

Olga A. Ivaschuk, Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

Nikolay I. Korsunov, Honoured Science Worker of Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

Alexander V. Koskin, Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

Vadim A. Lomazov, Doctor of Physico-mathematical Sciences, Professor (Russia)

Sergey I. Matorin, Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

Vasily G. Rubanov, Honoured Science Worker of Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

COMPUTER SIMULATION HISTORY

Самхарадзе К.К., Ерошенко Я.Б. Применение OpenGL в построении сетки рассеивания выбросов в атмосферу дорожно-строительной техники	3	Samkharadze K.K., Eroshenko Ya.B. Application of OpenGL in creation of the grid of dispersion of emissions in the atmosphere by the road-building technics	3
Маторин С.И., Жихарев А.Г., Белов С.П. Общесистемные закономерности и их учет в процессе графоаналитического моделирования в терминах «Узел-Функция-Объект»	12	Matorin S.I., Zhikharev A.G., Belov S.P. General systems of regularities and their accounting in the process of graphoanalytic modeling in terms "Unit-Function-Object"	12
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ		SYSTEM ANALYSIS AND PROCESSING OF KNOWLEDGE	
Пигнастый О.М., Белоусова Ю.О. Об устойчивости потоковых параметров производственной линии	23	Pihnastyi O.M., Belousova Yu.O. About the stability of flow parameters of a production line	23
Егоров И.А., Маторин С.И., Жихарев А.Г., Зайцев А.Н. Решение задач оптимизации в системно-объектных моделях	35	Egorov I.A., Matorin S.I., Zhikharev A.G., Zaitsev A.N. Solving optimization problems in system-object models	35
Кузнецов Д.А., Офицеров А.И., Кузнецов А.В., Чистяков С.В., Басов О.О. Предпосылки создания интеллектуального зала совещаний	44	Kuznetsov D.A., Ofiserov A.I., Kuznetsov A.V., Chistykov S.V., Basov O.O. The prerequisites of creation of the intellectual hall of meetings	44
ИНФОРМАЦИОННО- ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ		INFORMATION TECHNOLOGIES AND TELECOMMUNICATION	
Белов С.П., Маторин С.И., Белов А.С., Рачинский С.А., Нетеса В.В. Об оценке частотных свойств одного класса широкополосных шумоподобных сигналов с ЛЧМ	51	Belov S.P., Matorin S.I., Belov A.S., Rachinsky S.A., Netesa V.V. On estimation of frequency properties of one class of broadband noise-like signals with LFM	51
Коваленко В.А., Коваленко А.Н. О применении спектрального анализа в задачах обработки эмпирических данных	57	Kovalenko V.A., Kovalenko A.N. On the application of spectral analysis in problems of processing of empirical data	57

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ COMPUTER SIMULATION HISTORY

УДК 004.42

DOI: 10.18413/2518-1092-2018-3-2-0-1

Самхарадзе К.К.
Ерошенко Я.Б.

**ПРИМЕНЕНИЕ OPENGL В ПОСТРОЕНИИ СЕТКИ РАССЕЙВАНИЯ
ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКОЙ**

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы д. 85,
г. Белгород, 308015, Россия

e-mail: koba2111@mail.ru, eroshenko@bsu.edu.ru

Аннотация

Данная статья посвящена реализации основных возможностей графического интерфейса OpenGL при построении сетки рассеивания выбросов вредных веществ в атмосферу дорожно-строительной техникой, отмечена актуальность применения и основные преимущества библиотеки OpenGL относительно других графических интерфейсов. В статье описаны методы расчета параметров рассеивания вредных веществ в атмосферном воздухе, опирающиеся на нормативные документы, утвержденные законодательством РФ. Последовательно изложены основные шаги построения сетки рассеивания в виде 3D диаграммы с помощью OpenGL. Данная диаграмма предназначена для анализа и контроля за состоянием загрязняющих веществ в зоне строительства автомобильной дороги и показывает наиболее опасные для состояния окружающей среды участки и зоны безопасного влияния вредных веществ. В заключительной части статьи приведен пример построения сетки рассеивания оксида углерода (CO), как основного загрязняющего вещества воздушного бассейна строительной техникой.

Ключевые слова: библиотека OpenGL; выбросы в атмосферу; рассеивание выбросов; 3D диаграмма.

UDC 004.42

Samkharadze K.K.
Eroshenko Ya.B.

**APPLICATION OF OPENGL IN CREATION OF THE GRID OF DISPERSION
OF EMISSIONS IN THE ATMOSPHERE BY THE ROAD-BUILDING
TECHNICS**

Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia

e-mail: koba2111@mail.ru, eroshenko@bsu.edu.ru

Abstract

This article is devoted to the implementation of the main features of the OpenGL graphical interface for constructing a network of dispersion of harmful substances emissions into the atmosphere by road-building equipment while developing the information system, highlighting the relevance and main advantages of the OpenGL library relative to other graphical interfaces. The article describes methods for calculating the parameters of dispersion of harmful substances in the ambient air, based on normative documents approved by the legislation of the Russian Federation. Sequentially outlines the basic steps of building a diffusion grid in the form of a 3D diagram using OpenGL. Such diagram is intended for the analysis and control of the state of the pollutants in the road construction zone and shows the areas and zones of safe influence of harmful substances that are most dangerous for the state of the environment. In the final part of the article, an example is given

of constructing a grid of carbon monoxide (CO) scattering, as the main pollutant of the air basin by construction equipment.

Keywords: OpenGL; air emissions; emission dissipation grid; 3D diagram.

ВВЕДЕНИЕ

Современные информационные технологии невозможно представить без использования трехмерной графики и важной составной ее части – анимации. С этим связано множество разработок в области инженерии, компьютерных игр, специализированных информационных систем и др., где вся графика базируется на трехмерных графических ускорителях. Для повышения эффективности работы с ними применяются различные библиотеки, представляющие собой унифицированный интерфейс и действующие через драйверы устройств, которые используются ускорителями.

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

Существует несколько интерфейсов для работы с графическими ускорителями: Open Graphic Library (OpenGL), Direct3D, FireMonkey, Vulkan и др. Наиболее актуальным из них является графическая библиотека OpenGL. В отличие от Direct3D, который в основном контролируется компанией Microsoft и постоянно ею изменяется, что является не совсем удобным в использовании, OpenGL изначально разрабатывался для функционирования на различных рабочих платформах. Vulkan – это продукт компании Khronos Group, который пока только теоретически совместим с несколькими платформами, а его поддержка находится на ранней стадии. FireMonkey также имеет некоторые недостатки, к примеру отсутствие элементов, ориентированных на работу с данными, хранящихся в БД.

OpenGL не привязана к конкретной операционной системе, так как не имеет таких специальных команд, как работа с окнами и организация ввода-вывода, но содержит в себе большое множество команд, с помощью которых появляется возможность определять объекты и операции, необходимые для создания интерактивных трехмерных прикладных программ и приложений с использованием визуального контроля трехмерного объекта [1].

Актуальность применения библиотеки OpenGL подтверждается еще и тем, что ее производитель постоянно выпускает расширения к ней, содержащие новые необходимые возможности, связанные с изменением аппаратных средств, причем эти расширения в основном появляются раньше, чем новая версия к Direct3D [2].

OpenGL – это один из самых популярных программных интерфейсов для разработки приложений в области двумерной и трехмерной графики, который с помощью имеющегося набора команд, способен отобразить геометрические объекты на экране [3].

Все эти свойства библиотеки OpenGL позволяют ее использование в построении сетки рассеивания выбросов загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосферу в формате 3D.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ

Выбросы загрязняющих атмосферу веществ происходят в процессе любой производственной деятельности: промышленными предприятиями, транспортом и другими техническими установками. Их объем настолько высок, что уровень загрязнения становится опасным из-за превышения допустимых санитарных норм, что отрицательно влияет на здоровье человека и негативно сказываются на благосостоянии окружающей среды [4].

При поступлении ЗВ в окружающую среду происходит их рассеивание. В связи с этим необходимо осуществлять расчет параметров санитарно-защитной зоны и построение сетки рассеивания выбросов в формате 3D.

Расчет параметров рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе осуществляется на основании «Методов расчета рассеивания выбросов вредных (загрязняющих)

веществ в атмосферном воздухе» (далее Методы), утвержденных приказом Минприроды России от 6 июня 2017 года № 273 [5].

Согласно данным Методам на процесс рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе влияет несколько факторов таких, как техногенные параметры источников выбросов, метеорологические условия рассеивания и физико-географические особенности местности.

В результате рассеивания концентрации загрязняющих веществ в воздушной среде снижаются. В качестве техногенных параметров выступают высота источника выброса, температура выброса, определяемая как разность между температурой выбрасываемой источником смеси и температурой окружающей среды [6].

Графически рассеивание загрязняющих веществ в атмосфере можно представить движением выбросов от источника загрязнения по трем направлениям:

X – параллельно ветру и земле;

Y – параллельно земле и перпендикулярно ветру;

Z – перпендикулярно земле и ветру (см. рисунок 1) [7].

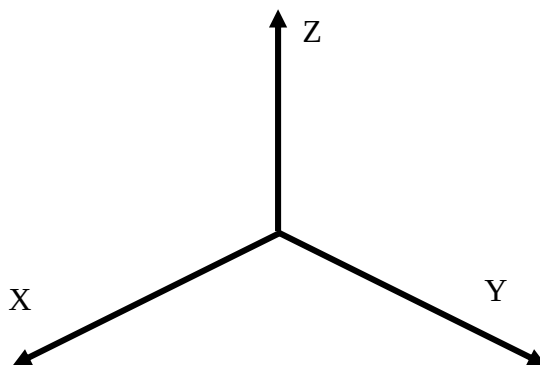


Рис. 1. Направления рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере
Fig. 1. Directions of dispersion of pollutants in the atmosphere

Для построения рассеивание загрязняющих веществ в плоскости XZ на основании Методов определяется расстояние x_m от источников выброса, на котором приземная концентрация загрязняющих веществ при неблагоприятных метеорологических условиях достигает максимального значения c_m по формуле:

$$x_m = \frac{5 - F}{4} \cdot d \cdot H, \quad (1)$$

где F – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания ЗВ в атмосферном воздухе;

H – высота источника выброса, м;

d – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от параметров, характеризующих свойства источника выброса.

Затем рассчитывается максимальная приземная концентрация загрязняющих веществ c_{mi} при неблагоприятных метеорологических условиях и скорости ветра u , отличающейся от опасной скорости ветра u_m , по следующей формуле:

$$c_{mi} = r \cdot c_m, \quad (2)$$

где c_m – максимальная приземная разовая концентрация ЗВ при опасной скорости ветра u_m , мг/м³;

r – безразмерная величина, зависящая от соотношения $\frac{u}{u_m}$.

Определение максимальной приземной разовой концентрации загрязняющих веществ c_m рассматривалось при расчете рассеивания выбросов в атмосферный воздух дорожно-строительной техникой [8].

Далее определяется расстояние от источника выброса $x_{м.и}$, на котором при скорости ветра u и неблагоприятных метеорологических условиях достигается максимальная приземная концентрация загрязняющих веществ $c_{ми}$ по формуле:

$$x_{м.и} = p \cdot x_{м}, \quad (3)$$

где p – безразмерная величина, зависящая от соотношения $\frac{u}{u_{м}}$.

На диаграмме рассеивание выбросов загрязняющих веществ в атмосферном воздухе в плоскости XZ имеет вид кривой (см. рисунок. 2).

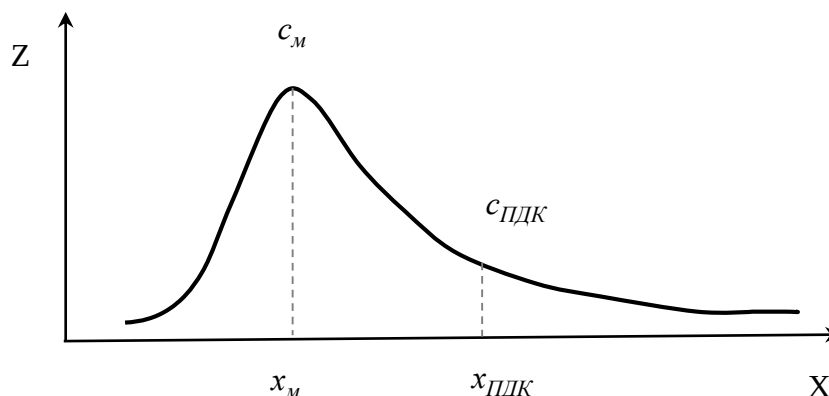


Рис. 2. Рассеивание загрязняющих веществ в плоскости XZ
Fig. 2. Dispersion of contaminants in the XZ plane

Для построения сетки рассеивания загрязняющих веществ в плоскости XYZ необходимо определить уровень приземной концентрации c_y в каждой точке (x; y) от источника выброса по формуле:

$$c_y = (s_1 \cdot c_{м}) \cdot s_2, \quad (4)$$

где s_1 – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от отношения $\frac{u}{u_{м}}$ и коэффициента F ;

s_2 – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от скорости ветра u .

На диаграмме сетка рассеивания загрязняющих веществ в плоскости XYZ выглядит следующим образом (см. рисунок 3):

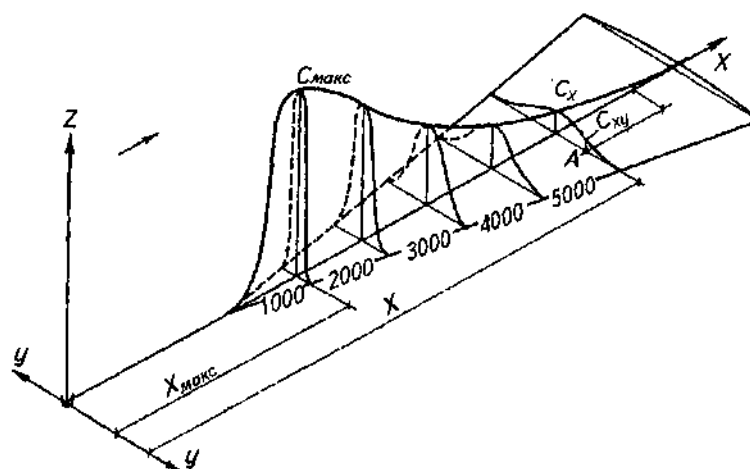


Рис. 3. Сетка рассеивания загрязняющих веществ
Fig. 3. Distribution grid for pollutants

Результатом построения сетки рассеивания является определение наиболее опасных зон, где необходимо в первую очередь осуществить мероприятия по предупреждению и снижению загрязнения атмосферного воздуха выбросами пыли и отработавшими газами, а также определение в этих зонах экологических рисков и рисков для здоровья населения, наносимых окружающей природной среде и человеку.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Для реализации процесса построения сетки рассеивания выбросов в атмосферный воздух от дорожно-строительной техники с помощью OpenGL необходимо сначала инициализировать плоскость сцены рисования.

Это можно сделать с помощью пользовательской функции:

```
template<typename T>
void InitOpenGL(T panel) {
    HDC = GetDC((HWND)panel->Handle.ToPointer());
    PixelFormat= ChoosePixelFormat(HDC, &pfd);
    SetPixelFormat(HDC, PixelFormat, &pfd);
    hRC = wglCreateContext(HDC);
    wglMakeCurrent(HDC, hRC);
}
```

Параметр panel – это контейнер, в котором будет происходить рисование геометрических примитивов.

Следующим шагом необходимо очистить сцену рисования и задать цвет фона, организовать вращение сцены в 3-х плоскостях, приближение и отдаление, а также задать параметры освещения [9].

Это можно сделать следующим образом:

```
// создаем контекст рисования
glClearColor(1.0, 1.0, 1.0, 1.0);
glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT | GL_DEPTH_BUFFER_BIT);
glLoadIdentity();

// вращение сцены
glRotated(angleX, 1.0, 0.0, 0.0);
glRotated(angleY, 0.0, 1.0, 0.0);
glRotated(angleZ, 0.0, 0.0, 1.0);

glScaled(pow(zoomX, -1.0), pow(zoomY, -1.0), pow(zoomZ, -1.0));

// освещение сцены
glEnable(GL_LIGHTING);
glEnable(GL_NORMALIZE);
GLfloat diffuse[] = { 1.0, 1.0, 1.0, 1.0 }; // диффузный цвет света
GLfloat position[] = { 0.0, 0.0, zoomZ, 1.0 }; // направление света
glEnable(GL_LIGHT0);
glLightfv(GL_LIGHT0, GL_DIFFUSE, diffuse);
glLightfv(GL_LIGHT0, GL_POSITION, position);
glEnable(GL_COLOR_MATERIAL);
```

Сетка рассеивания выбросов строится с помощью примитивных геометрических объектов OpenGL – линий типа GL_LINE_STRIP, когда каждая следующая вершина является концом текущего отрезка прямой и началом для следующего [10].

Рисование этих линий реализовано в пользовательской функции:


```
GLvoid glDrawLineStrip(List<Point3D^> ^points, Color ^color, GLdouble width = 1.0) {
    glColor4d(color->R / 256.0, color->G / 256.0, color->B / 256.0, color->A / 256.0);
    glLineWidth(width);
    glBegin(GL_LINE_STRIP);
    for (int i = 0; i < points->Count; i++)
        glVertex3d(points[i]->X, points[i]->Y, points[i]->Z);
    glEnd();
}

...
List<List<Point3D^>> ^data = substances[indexSubstance]->getCxy();
List<List<Point3D^>> ^data2 = gcnew List<List<Point3D^>>();
for (int i = 0; i < data[0]->Count; i++) {
    List<Point3D^> ^lines = gcnew List<Point3D^>();
    for (int j = 0; j < data->Count - 1; j++)
        lines->Add(gcnew Point3D(data[j][i]->X, data[j][i]->Y, data[j][i]->Z));
    data2->Add(lines);
}
for (int i = 0; i < data->Count; i++) {
    glDrawLineStrip(data[i], substances[indexSubstance]->getColor(), 1.0);
    for (int j = 0; j < data[i]->Count; j++) data[i][j]->Y *= -1.0;
    glDrawLineStrip(data[i], substances[indexSubstance]->getColor(), 1.0);
}
for (int i = 0; i < data2->Count; i++) {
    glDrawLineStrip(data2[i], substances[indexSubstance]->getColor(), 1.0);
    for (int j = 0; j < data2[i]->Count; j++) data2[i][j]->Y *= -1.0;
    glDrawLineStrip(data2[i], substances[indexSubstance]->getColor(), 1.0);
}
}
```

Для обозначения границ x_m и $x_{m,u}$ используем эллипсы соответствующих радиусов относительно центра источника выбросов.

Рисование эллипса реализовано в пользовательской функции:

```
GLvoid glDrawEllips(Point3D ^position, GLdouble radiusX, GLdouble radiusY, Color ^color, GLdouble width = 1.0) {
    glColor4d(color->R / 256.0, color->G / 256.0, color->B / 256.0, color->A / 256.0);
    glLineWidth(width);
    glBegin(GL_LINE_LOOP);
    unsigned long int amountSegments = 100;
    for (unsigned long int i = 0; i < amountSegments; i++) {
        GLdouble angle = 2.0 * Math::PI * (GLdouble)i / (GLdouble)amountSegments;
        GLdouble x3 = radiusX * sinf(angle);
        GLdouble y3 = radiusY * cosf(angle);
        glVertex3d(x3 + position->X, y3 + position->Y, position->Z);
    }
    glEnd();
}

...
double Xm = substances[indexSubstance]->getXm();
double Xmu = substances[indexSubstance]->getXmu();
glDrawEllips(gcnew Point3D(0.0, 0.0, 0.0), Xm, Xm, Color::Red, 2);
glDrawEllips(gcnew Point3D(0.0, 0.0, 0.0), Xmu, Xmu, Color::Green, 2);
glDrawEllips(gcnew Point3D(0.0, 0.0, 0.0), zoomX, zoomY, Color::Black, 2);
}
```

В качестве примера построим сетку рассеивания выбросов оксида углерода (CO) от дорожно-строительной техники (автогрейдера, трактора и асфальтоукладчика) на участке строительства дороги (см. рисунок 4) с помощью OpenGL и представим ее в виде 3D диаграммы.

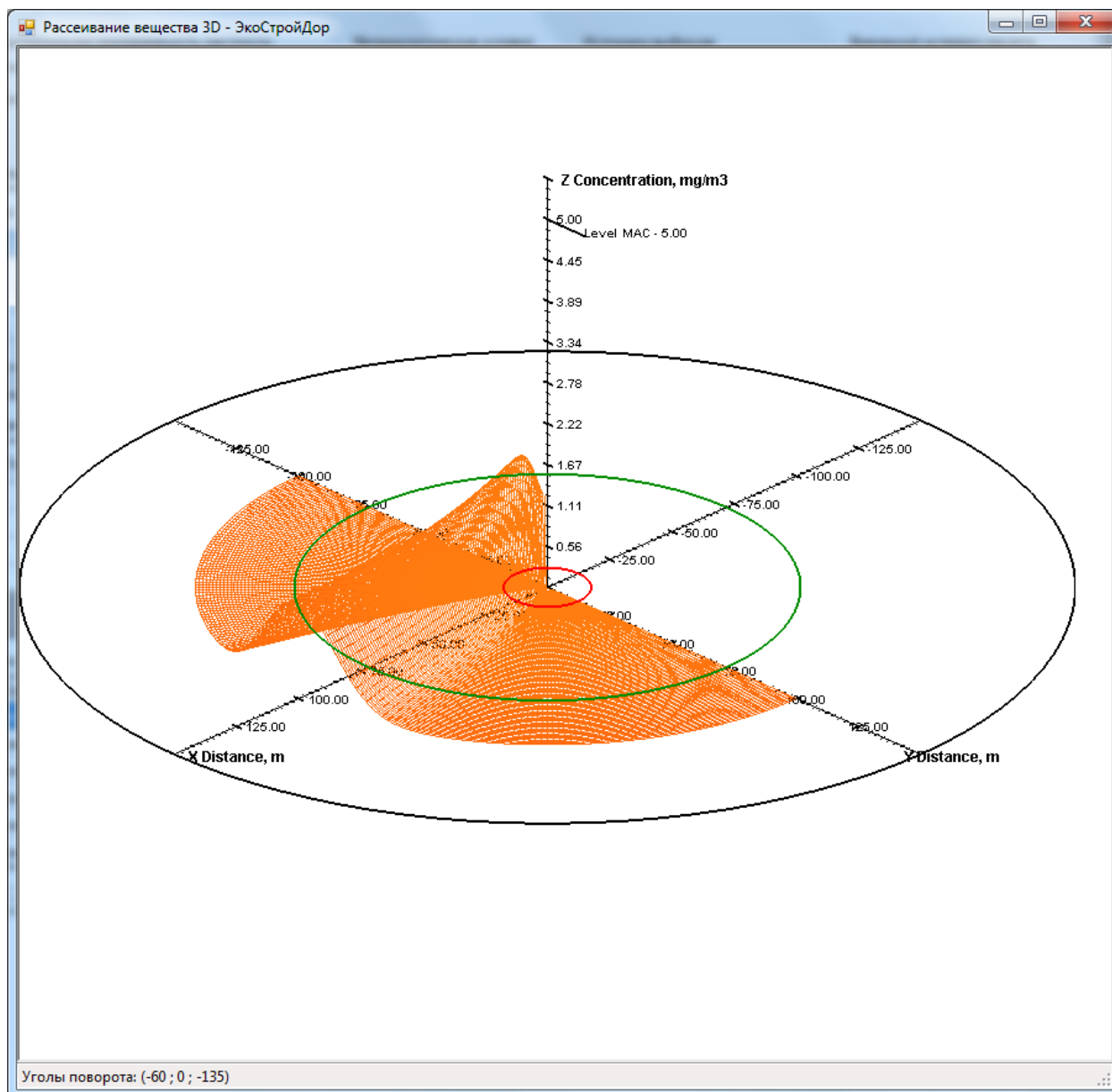


Рис. 4. Построение сетки рассеивания оксида углерода
Fig. 4. Construction of a network of carbon monoxide dispersal

На рисунке 4 видны зоны рассеивания оксида углерода (CO): красным цветом (на расстоянии $x_m = 12,6$ м от точки выброса) обозначена граница максимальной концентрации вредного вещества, зеленым цветом (на расстоянии $x_{m,u} = 76,8$ м от точки выброса) – граница концентрации при скорости ветра u , отличающейся от опасной скорости ветра u_m .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, библиотека OpenGL является одним из самых популярных программных интерфейсов для разработки приложений в области двумерной и трехмерной графики. К ее характерным особенностям относятся стабильность, надежность, постоянно развивающиеся дополнения и расширения, легкость в применении и понятный интерфейс. Это наиболее актуальное решение в построении сетки рассеивания выбросов вредных веществ в атмосферный воздух из различных источников.

В результате применения OpenGL в области построения сетки рассеивания выбросов формируется 3D диаграмма для визуального анализа и контроля состояния загрязняющих веществ в рабочей зоне.

Данная диаграмма служит наглядным материалом отображения наиболее опасных для состояния окружающей среды участков, зон предельно-допустимых значений и мест, где влияние вредных веществ является безопасным, и основой для планирования мероприятий по снижению уровня загрязнений как рабочей зоны, так и окружающего пространства жилой зоны в городских условиях.

Список литературы

1. Боресков А. В. Графика трехмерной компьютерной игры на основе OpenGL. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2004. 384 с.
2. Гайдуков С. А. OpenGL. Профессиональное программирование трехмерной графики на C++. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 736 с.
3. Учебное пособие по OpenGL. URL: <http://rdsn.org/article/opengl/ogl tutor.xml#E6B> (дата обращения: 26.02.2018).
4. Ерошенко Я. Б., Самхарадзе К. К. Мониторинг загрязнения воздушного бассейна строительной техникой // Инновации в науке: научный журнал. № 8 (69). Новосибирск: Изд. АНС «СибАК», 2017. С. 7-10.
5. Приказ Минприроды России от 06 июня 2017 г. № 273 «Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе». Информационно-правовой портал ГАРАНТ.РУ. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71642906/#ixzz4sqFY4uHz> (дата обращения: 26.02.2018).
6. Венцель В. Д., Сердюк В. С., Янчий С. В. Основы промышленной экологии и природопользования. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. 136 с.
7. Майорова Л. П., Тищенко Л. П., Тищенко А. А. Защита атмосферы: практикум. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, с. 2014. 117 с.
8. Ерошенко Я. Б., Самхарадзе К. К. Компьютерный анализ рассеивания выбросов в атмосферный воздух дорожно-строительной техникой // Научные ведомости БелГУ. Экономика. Информатика. 2018. Том 45, № 1. С. 111-117
9. OpenGL Red Book (русская версия). URL: <http://www.hardforum.ru/download/RedBook.pdf> (дата обращения: 20.03.2018).
10. Васильев С. А. OpenGL. Компьютерная графика. Тамбов: Изд-во Тамб. гос.техн. ун-та, 2005. 80 с.

References

1. Boreskov A. V. The graphics of a three-dimensional computer game based on OpenGL. M.: DIALOG-MIFI, 2004. 384 p.
2. Gajdukov S. A. OpenGL. Professional programming of three-dimensional graphics in C ++. SPb.: BHV-Peterburg, 2004. 736 p.
3. OpenGL tutorial. URL: <http://rdsn.org/article/opengl/ogl tutor.xml#E6B> (accessed: 26.02.2018).
4. Eroshenko Ja.B., Samharadze K.K. Construction machinery air pollution monitoring // Innovations in science: a scientific journal. № 8 (69). Novosibirsk: Izd. ANS «SibAK», 2017. P. 7-10.
5. Prikaz Minprirody Rossii ot 06 ijunja 2017 g. № 273 «On the approval of methods for calculating the dispersion of emissions of harmful (polluting) substances in the atmospheric air». Informacionno-pravovoj portal GARANT.RU. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71642906/#ixzz4sqFY4uHz> (accessed: 26.02.2018).
6. Vencel' V.D., Serdjuk V.S., Janchij S.V. Fundamentals of industrial ecology and nature management. Omsk: Izd-vo OmGTU, 2010. 136 p.
7. Majorova L.P., Tishhenko L.P., Tishhenko A.A. Protection of the Atmosphere: Workshop. Habarovsk: Izd-vo Tihookean. gos. un-ta, s. 2014. 117 p.

8. Eroshenko Ja.B., Samharadze K.K. Computer analysis of discrimination of emissions to atmospheric air by road-building technics // Belgorod State University Scientific Bulletin. Economics Information technologies 2018. Tom 45, № 1. P. 111-117.
9. OpenGL Red Book (Russian version). URL: <http://www.hardforum.ru/download/RedBook.pdf> (accessed: 20.03.2018).
10. Vasil'ev S.A. OpenGL. Computer graphics. Tambov: Izd-vo Tamb. gos.tehn. un-ta, 2005. 80 p.

Ерошенко Яна Борисовна, старший преподаватель кафедры математического и программного обеспечения информационных систем

Самхарадзе Коба Кобаевич, студент кафедры математического и программного обеспечения информационных систем

Samkharadze Koba Kobaevich, student at the Department of Mathematical and Software Information Systems

Eroshenko Yana Borisovna, senior lecturer at the Department of Mathematical and Software Information Systems

УДК: 001.51; 005

DOI: 10.18413/2518-1092-2018-3-2-0-2

Маторин С.И.¹
Жихарев А.Г.²
Белов С.П.¹

**ОБЩЕСИСТЕМНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ИХ УЧЕТ
В ПРОЦЕССЕ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
В ТЕРМИНАХ «УЗЕЛ-ФУНКЦИЯ-ОБЪЕКТ»**

¹ Белгородский университет кооперации, экономики и права, ул. Садовая, д. 116а,
г. Белгород, 308023, Россия

² Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы д. 85,
г. Белгород, 308015, Россия

e-mail: matorin@bsu.edu.ru, zhikharev@bsu.edu.ru, belov@bsu.edu.ru

Аннотация

В работе уточняется определение системы в терминах системно-объектного подхода «Узел-Функция-Объект», основанного на исчислении объектов Абади-Кардели, предложена формализация понятий «системообразующий фактор» и «адаптация системы». Представленные формализмы использованы для учета общесистемных закономерностей при построении графоаналитических моделей организационно-деловых и производственно-технологических процессов в терминах «Узел-Функция-Объект». Построено формальное описание общесистемных закономерностей, которое позволяет обосновать иерархическую зависимость между ними.

Ключевые слова: системный подход «Узел-Функция-Объект», общесистемные закономерности, графоаналитическое моделирование.

UDC 001.51; 005

Matorin S.I.¹
Zhikharev A.G.²
Belov S.P.¹

**APPLICATION OF OPENGL IN CREATION OF THE GRID
OF DISPERSION OF EMISSIONS IN THE ATMOSPHERE
BY THE ROAD-BUILDING TECHNIQS**

¹ Belgorod University of Cooperation, Economics and Law, 116a Sadovaya St., Belgorod, 308023, Russia

² Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia

e-mail: matorin@bsu.edu.ru, zhikharev@bsu.edu.ru, belov@bsu.edu.ru

Abstract

The definition of the system in terms of the system-object approach "Unit-Function-Object" based on the calculation of Abadi-Cardeli objects is specified in the work, the formalization of the concepts "system-forming factor" and "system adaptation" is proposed. The presented formalisms were used to take into account system-wide regularities in the construction of graphoanalytical models of organizational systems and business processes using the system-object method of representing knowledge. The revealed possible ways of taking into account the regularities are compared with the capabilities of the system-structural and object-oriented approaches, as well as the BPMN notation. A formal description of system-wide regularities is constructed, which allows one to justify the hierarchical dependence between them.

Keywords: system approach "Unit-Function-Object", system-wide regularities, graph analytical modeling.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при моделировании сложных систем (организационно-деловых и производственно-технологических процессов) широко применяются различные графические языки, например, средства системно-структурного или системно-функционального анализа DFD, IDEF0, IDEF3; средство объектного анализа UML; нотация BPMN (гибрид UML и IDEF3). Хотя эти средства/языки часто позиционируются как средства системного анализа, в их документации и примерах их использования не отмечаются возможности и последствия учета, так называемых, общесистемных закономерностей [1], большинство из которых были установлены во времена бурного развития системных исследований. В рамках традиционной теоретико-множественной теории систем эти закономерности только констатируются и описываются, но не обосновываются с единой позиции концептуальными средствами системного подхода ни по отдельности, ни во взаимодействии между собой [2].

Эти закономерности и их взаимосвязи получили обоснование в рамках системно-объектного подхода «Узел-Функция-Объект» (УФО-подход) [3, 4]. Последнее обстоятельство создает предпосылки учета общесистемных принципов и законов при моделировании сложных систем средствами системно-объектного подхода в терминах «Узел-Функция-Объект» [5, 6].

1. ИСХОДНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В рамках УФО-подхода система s представляется в виде специального объекта исчисления объектов Абади-Кардели [7] (называемого нами «узловым объектом»), состоящего из полей и методов: $s = [us, fs, Os]$, где:

us – **узел**, формально представляет собой поле узлового объекта для описания объектов еще одного специального вида (называемых нами «*потокowymi объектами*»), соответствующих множеству функциональных связей данной системы. $us \leftrightarrow Ls? \cup Ls!$, где $Ls?$ – множество входящих интерфейсных потоковых объектов, соответствующих входящим связям системы s , $Ls!$ – множество исходящих интерфейсных потоковых объектов, соответствующих выходящим связям системы s . Причем: $Ls? \subset L$ и $Ls! \subset L$, т.е. относятся к множеству всех связей L (потокowych объектов). При этом $L = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$, где n – количество потоковых объектов (связей системы); $l_i = [r_1, r_2, \dots, r_k]$, где $l_i \in L$; k – количество полей потокового объекта l_i ; $r_1, r_2, \dots, r_n$ – поля потокового объекта, представляющие собой пару «идентификатор-значение».

fs – **функция**, формально представляет собою метод узлового объекта, описывающий функцию системы s , т.е. процесс преобразования входящих интерфейсных потоковых объектов (входящих связей системы) $Ls?$ в выходящие $Ls!$. Далее, в соответствии с принятой в теории объектов манерой обозначений, метод узлового объекта будем представлять в следующем виде: $fs(Ls?)Ls!$, где fs – метод узлового объекта (функция/процесс системы s) с областью определения $Ls?$ и областью значений $Ls!$, соответственно.

Os – **объект**, формально представляющий собою множество полей узлового объекта для описания объектных (субстанциальных) характеристик системы s . Множество полей для описания объектных характеристик системы состоит из трех подмножеств: $Os = Os? \cup Os! \cup Osf$, где $Os?$ – множество полей, которое содержит интерфейсные входные характеристики узлового объекта (системы s), $Os!$ – множество полей, которое содержит интерфейсные выходные характеристики узлового объекта (системы s), Osf – множество полей, которое содержит передаточные характеристики узлового объекта (системы s).

Таким образом, в полном соответствии с содержательным определением системы как функционального объекта, функция которого обусловлена функцией объекта более высокого яруса (т.е. надсистемы) [8], система s , формально представляется в виде следующего выражения:

$$s = [(Ls?, Ls!); fs(Ls?)Ls!; (Os?, Os!, Osf)].$$

Упомянутое в определении системы явление обуславливания функции системы функцией надсистемы рассматривается как функциональный запрос надсистемы на систему с определенной

функцией (*внешняя детерминанта системы*). Эта детерминанта формально описывается полем **us** узлового объекта, соответствующего данной системе, т.е. множеством потоковых объектов, соответствующих функциональным связям системы (**Ls?**, **Ls!**). Внешняя детерминанта системы есть причина ее возникновения, цель ее существования и главный определитель ее структурных, функциональных и субстанциальных свойств. Таким образом, она рассматривается в качестве **универсального системообразующего фактора**. Функционирование же системы под влиянием внешней детерминанты является ее *внутренней детерминантой*, так как непосредственно определяет ее внутренние свойства (структурные, функциональные и субстанциальные свойства подсистем). Эта детерминанта формально описывается методом **fs** узлового объекта, соответствующего данной системе, т.е. в следующем виде: **fs(Ls?)Ls!**. Кроме того, функционирование системы в соответствии с внешней детерминантой устанавливает между системой и надсистемой *отношение поддержания функциональной способности более целого*.

Таким образом, можно уточнить формальное выражение для принятого определения системы следующим образом:

$$s = [us \Rightarrow fs \Rightarrow Os] \text{ и } s = [(Ls?, Ls!) \Rightarrow fs(Ls?)Ls! \Rightarrow (Os?, Os!, Osf)].$$

Процесс приближения внутренней детерминанты (**fs(Ls?)Ls!**) системы к ее внешней детерминанте (**Ls? $\cup$ Ls! $\leftrightarrow$ us**) представляет собой *адаптацию* системы к запросу надсистемы [8].

Полностью адаптированной считается система, у которой внутренняя детерминанта полностью соответствует внешней, т.е. **fs $\leftrightarrow$ us**. Такая система функционирует в полном соответствии с функциональным запросом надсистемы. Сама адаптация представляет собой процесс приближения текущего функционирования системы к требуемому, т.е. **fs_{тек} $\rightarrow$ fs $\leftrightarrow$ us**. Узел **us** определяет область определения и область значений функции (**Dfs = Ls?** и **Efs = Ls!**) системы **s**. Параметры преобразования/отображения **fs: Ls? $\rightarrow$ Ls!** определяются объектными характеристиками **Os** системы **s**, задающими конкретные параметры приема системой входных потоков (**Os?**), параметры выполнения процесса **fs** (**Os!**) и параметры выдачи системой выходных потоков (**Os!**). Таким образом, приближение **fs_{тек}** к **fs** обусловлено соответствующим изменением **Os = Os? $\cup$ Os! $\cup$ Os!**.

Для анализа возможностей системно-объектного подхода учитывать общесистемные закономерности необходимо эти закономерности формально описать, используя приведенные выше понятия.

2. УЧЕТ ОБЩЕСИСТЕМНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ НА УРОВНЕ УЗЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ

В первую очередь необходимо исследовать закономерности, связанные со структурными (узловыми) характеристиками систем, так как именно узловая характеристика системы, как было отмечено выше, рассматривается в качестве универсального системообразующего фактора в рамках системно-объектного подхода.

Принцип коммуникативности (*система связана множеством коммуникаций с окружающей средой*). Используя упомянутые выше термины и обозначения данный принцип можно представить в виде следующего выражения: $\forall s \exists us: us \leftrightarrow Ls? \cup Ls!$.

В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода данный принцип учитывается, в первую очередь, на контекстной диаграмме в виде функциональных (внешних) связей системы, которые далее замыкаются через внутренние (поддерживающие) связи данной системы на диаграммах декомпозиции разного уровня. Системно-объектный подход требует обязательного наличия хотя бы одного входа и, хотя бы одного выхода у любой системы на любом уровне иерархии.

Принцип иерархичности (*система на любом ярусе иерархии является частью системы более высокого яруса, т.е. надсистемы*). Используя упомянутые выше термины и обозначения данный принцип можно представить в виде следующего выражения:

$$\forall s \exists us: us \in us^* \Rightarrow s \in s^* (s^* \ni s). \text{ Т.е. } \forall us \exists us^*: us^* \ni us,$$

где us^* – узел системы s^* ; s^* – система более высокого яруса по сравнению с системой s .

Из данного выражения видно, что принцип иерархичности работоспособен только при выполнении принципа коммуникативности, т.е. когда справедливо $\forall s \exists us$, что хорошо согласуется с содержательной трактовкой этих принципов в терминах системно-объектного подхода [3].

В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода данный принцип учитывается в виде иерархии диаграмм декомпозиции произвольного числа уровней.

Принцип моноцентризма (по Богданову [9]: *устойчивая система обладает одним центром*). С точки зрения авторов, трактующих данный принцип более широко [10], используя упомянутые выше термины и обозначения данный принцип можно представить в виде следующего выражения:

$$\forall us \exists !us^*: us^* \ni \dots \ni us^i \ni \dots \ni us^2 \ni us^1 \ni us \text{ (или } us \in us^1 \in us^2 \in \dots \in us^i \in \dots \in us^*) \Rightarrow s^* \ni \dots \ni s^i \ni \dots \ni s^2 \ni s^1 \ni s,$$

где us^1 – узел системы s^1 ; us^2 – узел системы s^2 ; us^i – узел системы s^i .

Из данного выражения видно, что принцип моноцентризма работоспособен только при выполнении принципа иерархичности, т.е. если справедливо $\forall us \exists us^*$, что также хорошо согласуется с содержательной трактовкой этих принципов.

В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода данный принцип учитывается в виде контекстной диаграммы с одной системой.

Принцип организационной непрерывности (*констатирует факт наличия между всякими двумя системами звеньев, вводящих их в одну «цепь ингрессии»*). Используя упомянутые выше термины и обозначения данный принцип можно представить в виде следующего выражения:

$$\forall (us_i \wedge us_j) \exists L_{ij}: L_{ij} \ni (Ls_i \wedge Ls_j),$$

где us_i – узел системы s_i ; us_j – узел системы s_j ; L_{ij} – множество (цепочка) связей между s_i и s_j ; Ls_i – множество связей s_i ; Ls_j – множество связей s_j .

Можно показать, что данный принцип, также установленный Богдановым [9], выполняется только в условиях моноцентризма, понимаемого расширенно [10], т.е.:

$$\forall (us_i \wedge us_j) \exists L_{ij}: L_{ij} \ni (Ls_i \wedge Ls_j) \Leftrightarrow \forall us \exists !us^*.$$

Пусть система s_i является частью иерархии систем так, что: $us_i \in us^{1i} \in us^{2i} \in us^{3i} \in \dots \in us^n$, т.е. самый верхний уровень данной иерархии представляет собой систему s^n . Система s_j является частью иерархии систем так, что: $us_j \in us^{1j} \in us^{2j} \in us^{3j} \in \dots \in us^m$, т.е. самый верхний уровень данной иерархии представляет собой систему s^m . Допустим, что $\forall us \exists !us^*: us^* \ni us$ не верно (принцип моноцентризма не выполняется), т.е. $us^n \notin us^*$ и $us^m \notin us^*$. Тогда $\exists (us_i \wedge us_j): Ls_i \cap Ls_j = \emptyset$. Следовательно, L_{ij} не является *множеством связей между всякими двумя системами*, т.е. принцип организационной непрерывности не выполняется. Полученный вывод можно рассматривать как дополнительный аргумент в пользу расширенного понимания моноцентризма.

В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода данный принцип учитывается путем прослеживания связей между системами в рамках всей модели.

Принцип обратной связи (*устойчивость в сложных динамических системах достигается за счёт замыкания петель обратных связей*). Используя упомянутые выше термины и обозначения данный принцип можно представить в виде следующего выражения:

$$\exists ((L_{ij} \ni (Ls_i! \wedge Ls_j?)) \wedge (L_{ji} \ni (Ls_j! \wedge Ls_i?))) \Rightarrow \exists us \ni (us_i \wedge us_j) \Rightarrow \exists s \ni (s_i \wedge s_j),$$

где L_{ij} – множество связей между s_i и s_j ; L_{ji} – множество связей между s_j и s_i ; $Ls_i!$ – множество выходных связей s_i ; $Ls_j?$ – множество входных связей s_j ; $Ls_j!$ – множество выходных связей s_j ; $Ls_i?$ – множество входных связей s_i .

Из данного выражения видно, что принцип обратной связи работоспособен только при выполнении принципа коммуникативности, т.е. если справедливо $\forall s \exists us: us \leftrightarrow Ls? \cup Ls!$, что также хорошо согласуется с содержательной трактовкой этих принципов.

В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода данный принцип учитывается в виде двухсторонних связей и на контекстной диаграмме, и на диаграммах декомпозиции в соответствии с правилом замкнутости, входящим в концепцию системной теории, основанной на системно-объектном подходе [4].

Принцип прогрессирующей сегрегации (фиксирует прогрессирующую потерю взаимодействия между элементами системы в ходе ее дифференциации при усилении связей с некоторым элементом, выступающим в роли системного центра). Используя упомянутые выше термины и обозначения данный принцип можно представить в виде следующего выражения:

$$\exists us: us \ni (us_i \wedge us_j): (Ls_i \cap Ls_j) \rightarrow \emptyset \Rightarrow ((Ls_i \cap Ls) \wedge (Ls_j \cap Ls)) \rightarrow \infty.$$

Принцип прогрессирующей сегрегации работоспособен только при выполнении принципа иерархичности, т.е. если справедливо $\forall us \exists us^*$, что согласуется с содержательной трактовкой этих принципов.

В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода данный принцип учитывается на диаграмме декомпозиции любого уровня в виде сокращения внутренних связей и появления новых граничных связей.

Принцип внешнего дополнения (восходящие к системному центру воздействия координируемых элементов подвергаются своеобразному «обобщению», а нисходящие от системного центра координационные импульсы подвергаются «специфицированию» в зависимости от характера локальных процессов за счет обратных связей от этих процессов). Используя упомянутые выше термины и обозначения данный принцип можно представить в виде следующих выражений:

$$\exists us \in (us^1 \in us^2 \in \dots \in us^{i-1} \in us^i) \Rightarrow \exists ((Ls^1! \cap Ls^{1?}) \subset (Ls^{1!} \cap Ls^{2?}) \subset \dots \subset (Ls^{i-1!} \cap Ls^{i?})) \text{ и}$$

$$\exists us^i \ni (us^{i-1} \ni \dots \ni us^2 \ni us^1 \ni us) \Rightarrow \exists ((Ls^{i!} \cap Ls^{i-1?}) \supset \dots \supset (Ls^{2!} \cap Ls^{1?}) \supset (Ls^{1!} \cap Ls^{?})).$$

Принцип внешнего дополнения работоспособен только при выполнении принципа иерархичности с учетом принципа обратной связи.

В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода данный принцип учитывается возможностью содержательной декомпозиции материальных и информационных потоков при декомпозиции процессов и объектов, поскольку в концепцию системно-объектного подхода входит содержательная категориальная классификация потоков связей [11].

Принцип взаимно-дополнительных соотношений/комплиментарности (устойчивость системы достигается взаимно-дополнительными связями между её элементами в виде замкнутых контуров обратных связей). Используя упомянутые выше термины и обозначения данный принцип можно представить в виде следующего выражения:

$$\forall s \ni (s_i \wedge s_j) \exists us \ni (us_i \wedge us_j): \exists ((L_{ij} \ni (Ls_i! \wedge Ls_j?)) \wedge (L_{ji} \ni (Ls_j! \wedge Ls_i?))).$$

Принцип комплиментарности работоспособен только при выполнении принципа обратной связи. По сути дела, это один и тот же принцип. По мнению авторов, принцип обратной связи следует рассматривать как потенциальную возможность существования обратных связей, а принцип комплиментарности как реализацию (экстенцию) такой возможности для обеспечения устойчивости системы.

В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода данный принцип учитывается, как принцип обратной связи, в виде двухсторонних связей и на контекстной диаграмме, и на диаграммах декомпозиции в соответствии с правилом замкнутости, входящим в концепцию системной теории, основанной на системно-объектном подходе [4].

3. УЧЕТ ОБЩЕСИСТЕМНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ НА УРОВНЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ

Далее необходимо исследовать закономерности, связанные с функциональными характеристиками систем, которые, как было отмечено выше, в рамках системно-объектного подхода являются следствием узловых.

Гипотеза семиотической непрерывности (система есть образ её среды, т.е. система как элемент окружающей среды отражает некоторые существенные ее свойства). Согласно системно-объектного подхода главной составляющей среды, окружающей систему, является ее надсистема. Эта надсистема «отображает» свою функциональность на функциональность системы с помощью функционального запроса на систему с определенной функцией (внешней детерминанты) и, таким образом, система своим функционированием (внутренней детерминантой) «отражает» некоторые функциональные (т.е. самые существенные) свойства своей надсистемы. При этом функциональный запрос надсистемы (внешняя детерминанта системы) представляет собой набор связей запрашиваемой системы с другими системами, т.е. узел данной системы. Такое понимание семиотической непрерывности позволяет, используя упомянутые выше термины и обозначения, представить данный принцип в виде следующих выражений:

$$\exists s \in s^* \Rightarrow \exists us \in us^*: (us^* = Ls^*? \cup Ls^*!) \Rightarrow fs^*(Ls^*?)Ls^*! (fs^*: Ls^*? \rightarrow Ls^*!) \Rightarrow (us = Ls^*? \cup Ls^*!) \Rightarrow fs(Ls^*?)Ls^*! (fs: Ls^*? \rightarrow Ls^*!) \text{ и } fs(Ls^*?)Ls^*! \in fs^*(Ls^*?)Ls^*!,$$

т.е. $fs^*(Ls^*?)Ls^*! \Rightarrow (us = Ls^*? \cup Ls^*!) \Rightarrow fs(Ls^*?)Ls^*! : fs \in fs^*$.

где $Ls^*?$ – множество входных связей s^* ; $Ls^*!$ – множество выходных связей s^* ; fs – функция s ; fs^* – функция s^* .

Данное представление семиотической непрерывности позволяет рассматривать данную закономерность не как гипотезу, а как основу всех общесистемных закономерностей, связанных с функциональными характеристиками систем. Очевидно, что гипотеза семиотической непрерывности справедлива только при выполнении принципа иерархичности, т.е. если справедливо $\forall us \exists us^*$.

В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода данный принцип учитывается таким образом, что функциональный запрос надсистемы к системе (т.е. самое существенное ее свойство) отображается в виде требуемых функциональных связей системы, т.е. в виде узла, на любом уровне иерархии.

Принцип прогрессирующей механизации (части системы в ходе ее развития специализируются или становятся фиксированными по отношению к определенным функциям или механизмам) Используя упомянутые выше термины и обозначения данный принцип можно представить в виде следующих выражений:

$$\begin{aligned} \exists (s_i \wedge s_j) \in s \Rightarrow \exists (us_i \wedge us_j) \in us : (us = Ls^*? \cup Ls^*!) \Rightarrow fs(Ls^*?)Ls^*! (fs: Ls^*? \rightarrow Ls^*!); \\ fs(Ls^*?)Ls^*! \Rightarrow us_i \Rightarrow fs_i(Ls_i^*?)Ls_i^*!, (fs_i: Ls_i^*? \rightarrow Ls_i^*!); \\ fs(Ls^*?)Ls^*! \Rightarrow us_j \Rightarrow fs_j(Ls_j^*?)Ls_j^*!, (fs_j: Ls_j^*? \rightarrow Ls_j^*!), \end{aligned}$$

где fs_i – функция s_i ; fs_j – функция s_j .

Принцип прогрессирующей механизации работоспособен только при условии справедливости гипотезы семиотической непрерывности, т.е. $fs^*(Ls^*?)Ls^*! \Rightarrow (us = Ls^*? \cup Ls^*!) \Rightarrow fs(Ls^*?)Ls^*!$.

В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода данный принцип учитывается таким образом, что подсистемы на диаграммах декомпозиции любого уровня возникают как следствия существования граничных связей, т.е. связей верхнего уровня иерархии.

Принцип актуализации функций (объект выступает как организованный лишь в том случае, если свойства его частей (элементов) проявляются как функции сохранения и развития этого объекта). Используя упомянутые выше термины и обозначения данный принцип можно представить в виде следующих выражений:

$$\begin{aligned} \exists (us_i \wedge us_j) \in us : (us = Ls^*? \cup Ls^*!) \Rightarrow fs(Ls^*?)Ls^*! (fs: Ls^*? \rightarrow Ls^*!); \\ ((us_i \Rightarrow fs_i(Ls_i^*?)Ls_i^*!) \wedge (us_j \Rightarrow fs_j(Ls_j^*?)Ls_j^*!)) \in fs(Ls^*?)Ls^*! \Rightarrow \exists s \exists (s_i \wedge s_j). \end{aligned}$$

Таким образом, принцип актуализации функций и принцип прогрессирующей механизации описывают одно и то же явление функционального соответствия элементов системы разного уровня иерархии, но с разных сторон: прогрессирующая механизация – с верху в низ, актуализация функций – с низу в верх. Соответственно данный принцип работает только при выполнении

предыдущего, так как существование любой системы обусловлено функциональным запросом надсистемы на систему с определенной функцией.

В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода данный принцип учитывается таким образом, что подсистемы на иерархии диаграмм любого уровня декомпозиции являются поддерживающими частями систем верхнего уровня.

Принцип самоорганизации (процесс поступательной функционализации элементов системы). Используя упомянутые выше термины и обозначения данный принцип можно представить в виде следующего выражения:

$$\exists (s_i \in s_{i-1} \in \dots \in s_2 \in s_1) \in s \Rightarrow \exists us: (us = Ls? \cup Ls!) \Rightarrow fs(Ls?)Ls! (fs: Ls? \rightarrow Ls!) \Rightarrow \exists us_1 \Rightarrow fs_1(Ls_1?)Ls_1! \Rightarrow \exists us_2 \Rightarrow fs_2(Ls_2?)Ls_2! \Rightarrow \dots \Rightarrow \exists us_{i-1} \Rightarrow fs_{i-1}(Ls_{i-1}?)Ls_{i-1}! \Rightarrow \exists us_i \Rightarrow fs_i(Ls_i?)Ls_i!.$$

Принцип самоорганизации работоспособен только при условии выполнения принципа прогрессирующей механизации, т.е. $fs^*(Ls^*)Ls^*! \Rightarrow (us = Ls? \cup Ls!) \Rightarrow fs(Ls?)Ls!$ И, по сути дела, уточняет последний.

В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода данный принцип учитывается, как и предыдущий.

Закон иерархических компенсаций (в системе рост разнообразия на верхнем уровне иерархии обеспечивается его ограничением на более низких уровнях). Используя упомянутые выше термины и обозначения данный принцип можно представить в виде следующих выражений:

$$\forall s \ni (s_1 \ni s_2 \ni \dots \ni s_{i-1} \ni s_i) \exists us: (us = Ls? \cup Ls!) \Rightarrow fs(Ls?)Ls! (fs: Ls? \rightarrow Ls!).$$

$$\forall s_1 \in s \exists us_1: (us_1 = Ls_1? \cup Ls_1!) \Rightarrow fs_1(Ls_1?)Ls_1! \in fs(Ls?)Ls!;$$

$$\forall s_2 \in s_1 \exists us_2: (us_2 = Ls_2? \cup Ls_2!) \Rightarrow fs_2(Ls_2?)Ls_2! \in fs_1(Ls_1?)Ls_1!;$$

$$\forall s_{i-1} \in \dots \in s_2 \exists us_{i-1}: (us_{i-1} = Ls_{i-1}? \cup Ls_{i-1}!) \Rightarrow fs_{i-1}(Ls_{i-1}?)Ls_{i-1}! \in \dots \in fs_2(Ls_2?)Ls_2!.$$

$$\forall s_i \in s_{i-1} \exists us_i: (us_i = Ls_i? \cup Ls_i!) \Rightarrow fs_i(Ls_i?)Ls_i! \in fs_{i-1}(Ls_{i-1}?)Ls_{i-1}!.$$

$$\text{T.e. } fs_i(Ls_i?)Ls_i! \in fs_{i-1}(Ls_{i-1}?)Ls_{i-1}! \in \dots \in fs_2(Ls_2?)Ls_2! \in fs_1(Ls_1?)Ls_1! \in fs(Ls?)Ls!$$

Закон иерархических компенсаций работоспособен только при условии выполнения принципа прогрессирующей механизации и также его, по сути дела, уточняет.

В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода данный принцип учитывается таким образом, что в модели системы процессы верхнего уровня соответствуют более общим разнообразным функциям. Процессы нижнего уровня соответствуют более специальным ограниченным функциям.

Закон необходимого разнообразия (для создания системы, способной справиться с решением проблемы, обладающей определенным разнообразием, необходимо обеспечить, чтобы система имела большее разнообразие возможностей, чем разнообразие решаемой проблемы). Используя упомянутые выше термины и обозначения данный принцип можно представить в виде следующих выражений:

$$\forall s_i \in (s_{i-1} \in \dots \in s_2 \in s_1 \in s) \exists us_i: (us_i = Ls_i? \cup Ls_i!) \Rightarrow fs_i(Ls_i?)Ls_i! \in fs_{i-1}(Ls_{i-1}?)Ls_{i-1}!.$$

$$\forall s_{i-1} \in \dots \in s_2 \exists us_{i-1}: (us_{i-1} = Ls_{i-1}? \cup Ls_{i-1}!) \Rightarrow fs_{i-1}(Ls_{i-1}?)Ls_{i-1}! \in \dots \in fs_2(Ls_2?)Ls_2!;$$

$$\forall s_2 \in s_1 \exists us_2: (us_2 = Ls_2? \cup Ls_2!) \Rightarrow fs_2(Ls_2?)Ls_2! \in fs_1(Ls_1?)Ls_1!;$$

$$\forall s_1 \in s \exists us_1: (us_1 = Ls_1? \cup Ls_1!) \Rightarrow fs_1(Ls_1?)Ls_1! \in fs(Ls?)Ls!;$$

$$\text{T.e. } fs(Ls?)Ls! \ni fs_1(Ls_1?)Ls_1! \ni fs_2(Ls_2?)Ls_2! \ni \dots \ni fs_{i-1}(Ls_{i-1}?)Ls_{i-1}! \ni fs_i(Ls_i?)Ls_i!$$

Закон необходимого разнообразия работоспособен только при условии выполнения закона иерархических компенсаций, так как для обеспечения необходимого разнообразия используется механизм иерархических компенсаций. Эти две закономерности соотносятся друг с другом также как принципы прогрессирующей механизации и актуализации функций.

В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода данный принцип учитывается, как и предыдущий.

4. УЧЕТ ОБЩЕСИСТЕМНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ НА УРОВНЕ ОБЪЕКТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ

Для завершения исследования необходимо рассмотреть закономерности, связанные с субстанциальными (объектными) характеристиками систем, которые, как было отмечено выше, в рамках системно-объектного подхода являются следствием функциональных.

Принцип совместимости (условием взаимодействия между системами является наличие у них относительной совместимости, то есть относительной качественной и организационной однородности). Используя упомянутые выше термины и обозначения данный принцип можно представить в виде следующих выражений:

$$\exists us_i: (us_i = Ls_i? \cup Ls_i!) \Rightarrow fs_i(Ls_i?)Ls_i! \Rightarrow Os_i = Os_i? \cup Os_i! \cup Os_{if} \Rightarrow \exists s_i.$$

$$\exists us_j: (us_j = Ls_j? \cup Ls_j!) \Rightarrow fs_j(Ls_j?)Ls_j! \Rightarrow Os_j = Os_j? \cup Os_j! \cup Os_{jf} \Rightarrow \exists s_j.$$

$$\exists us: (us = Ls? \cup Ls!) \Rightarrow fs(Ls?)Ls! \Rightarrow Os = Os? \cup Os! \cup Os_f \Rightarrow \exists s.$$

$$((Ls_i! \cap Ls_j?) \vee (Ls_j! \cap Ls_i?) \neq \emptyset) \wedge ((fs_i(Ls_i?)Ls_i! \wedge fs_j(Ls_j?)Ls_j!) \in fs(Ls?)Ls!) \wedge ((Os_i! \leftrightarrow Os_j?) \vee (Os_j! \leftrightarrow Os_i?)) \Rightarrow \exists (L_{ij} \vee L_{ji}) \Rightarrow \exists s \exists (s_i \wedge s_j),$$

где $Os_i?$ – множество входных интерфейсных характеристик s_i ; $Os_i!$ – множество выходных интерфейсных характеристик s_i ; Os_{if} – множество переходных объектных характеристик s_i ; $Os_j?$ – множество входных интерфейсных характеристик s_j ; $Os_j!$ – множество выходных интерфейсных характеристик s_j ; Os_{jf} – множество переходных объектных характеристик s_j .

Из приведенных выражений видно, что принцип совместимости работоспособен только при условии выполнения принципа организационной и гипотезы семиотической непрерывности.

В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода данный принцип учитывается установленными правилами системной композиции, базовой иерархией связей и классификацией узлов [3].

Принцип эквифинальности (способность системы достигать состояния, которое не зависит от времени и начальных условий, а зависит только от параметров системы). Используя упомянутые выше термины и обозначения данный принцип можно представить в виде следующего выражения:

$$\forall s \exists us: (us = Ls? \cup Ls!) \Rightarrow fs(Ls?)Ls!, fs: Ls? \rightarrow Ls! \Rightarrow Os = Os? \cup Os! \cup Os_f.$$

При этом узловая характеристика системы us рассматривается как ее важнейший параметр, т.к. представляет собой функциональный запрос надсистемы, определяющий причину и смысл существования данной системы. Принцип эквифинальности работоспособен только при условии выполнения принципа самоорганизации, т.е. «эквифинальное» состояние достигается за счет поступательной функционализации элементов системы, направляемой ее внешней детерминантой us .

В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода данный принцип учитывается в виде диаграмм декомпозиции, состояние которых зависит только от контекстных диаграмм, отображающих функциональный запрос на систему с определенной функцией.

Закон минимума (устойчивость системы определяется устойчивостью ее самого слабого звена). По мнению авторов, устойчивость системы в значительной степени зависит от того насколько данная система адаптирована к запросу надсистемы. Таким образом, устойчивая система s – это система, для которой: $Os \leftrightarrow fs(Ls?)Ls! \leftrightarrow us$, т.е. система полностью адаптированная к запросу надсистемы. Используя упомянутые выше термины и обозначения данный принцип можно представить в виде следующих выражений:

$$\exists s: Os \leftrightarrow fs(Ls?)Ls! \leftrightarrow us \Rightarrow \exists us: (us = Ls? \cup Ls!) \Rightarrow fs(Ls?)Ls!, fs: Ls? \rightarrow Ls! \Rightarrow Os = Os? \cup Os! \cup Os_f.$$

Пусть $s \exists (s_i \wedge s_j)$.

$$\exists s_i: Os_i \leftrightarrow fs_i(Ls_i?)Ls_i! \leftrightarrow us_i \Rightarrow \exists us_i: (us_i = Ls_i? \cup Ls_i!) \Rightarrow fs_i(Ls_i?)Ls_i! \Rightarrow Os_i = Os_i? \cup Os_i! \cup Os_{if};$$

$$fs_i(Ls_i?)Ls_i! \in fs(Ls?)Ls!;$$

$$\exists s_j: O's_j \leftrightarrow f's_j(Ls_j?)Ls_j! \leftrightarrow us_j \Rightarrow \exists us_j: (us_j = Ls_j? \cup Ls_j!) \Rightarrow (f's_j(Ls_j?)Ls_j! \in fs(Ls_j?)Ls_j!) \Rightarrow (O's_j \supset O_sj),$$

где $O's_j$ – множество объектных характеристик не адаптированной системы; $f's_j$ – функция не адаптированной системы.

Степень устойчивости s определится степенью адаптированности/устойчивости s_j , которая представляет собой самое слабое звено, так s_j не до конца адаптирована к функциональному запросу со стороны s .

Закон минимума работоспособен только при условии выполнения принципа самоорганизации, так как именно за счет механизма самоорганизации происходит адаптация элементов системы к их функциональным запросам.

Учет данного принципа в процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода обеспечивается возможностью описания процесса адаптации системы к запросу надсистемы за счет изменения объектных характеристик.

Закон расхождения (различные части однородной системы подвержены действию сил, различающихся по качеству и величине, вследствие чего они изменяются различно). Используя упомянутые выше термины и обозначения данный принцип можно представить в виде следующих выражений:

$$\exists s \exists (s_i \wedge s_j): s_i \sim s_j.$$

$$\forall s \exists us: (us = Ls? \cup Ls!) \Rightarrow fs(Ls?)Ls!, fs: Ls? \rightarrow Ls! \Rightarrow Os = Os? \cup Os! \cup Osf.$$

$$\forall s \exists s_i \exists fs(Ls?)Ls! \Rightarrow \exists us_i: (us_i = Ls_i? \cup Ls_i!) \Rightarrow \exists fs_i(Ls_i?)Ls_i! \Rightarrow \exists Os_i = Os_i? \cup Os_i! \cup Os_if.$$

$$\forall s \exists s_j \exists fs(Ls?)Ls! \Rightarrow \exists us_j: (us_j = Ls_j? \cup Ls_j!) \Rightarrow \exists fs_j(Ls_j?)Ls_j! \Rightarrow \exists Os_j = Os_j? \cup Os_j! \cup Os_jf.$$

$$us_i \neq us_j \Rightarrow fs_i \neq fs_j \Rightarrow Os_i \neq Os_j \Rightarrow s_i \neg \sim s_j.$$

Закон расхождения работоспособен только при условии выполнения принципа прогрессирующей механизации при разных функциональных запросах к s_i и s_j .

Учет данного принципа в процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода обеспечивается возможностью описания процесса адаптации системы к запросу надсистемы за счет изменения объектных характеристик.

Закон опыта (единообразное воздействие на некоторое множество элементов уменьшает разнообразие состояний этого множества). Используя упомянутые выше термины и обозначения данный принцип можно представить в виде следующих выражений:

$$\forall s_i \exists us_i: (us_i = Ls_i? \cup Ls_i!) \Rightarrow fs_i(Ls_i?)Ls_i! \Rightarrow Os_i = Os_i? \cup Os_i! \cup Os_if.$$

$$\forall s_j \exists us_j: (us_j = Ls_j? \cup Ls_j!) \Rightarrow fs_j(Ls_j?)Ls_j! \Rightarrow Os_j = Os_j? \cup Os_j! \cup Os_jf.$$

$$us_i \sim us_j \Rightarrow fs_i \sim fs_j \Rightarrow Os_i \sim Os_j$$

Закон расхождения работоспособен только при условии выполнения принципа прогрессирующей механизации в условиях подобных функциональных запросов к s_i и s_j .

Учет данного принципа в процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода обеспечивается возможностью описания процесса адаптации системы к запросу надсистемы за счет изменения объектных характеристик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследованы и показаны возможности системно-объектного подхода (подхода «Узел-Функция-Объект») учитывать общесистемные закономерности в графоаналитических моделях организационно-деловых и производственно-технологических процессов.

Предложенный вариант формального описания общесистемных закономерностей дает возможность установить иерархическую зависимость закономерностей, связанных с субстанциальными характеристиками систем, от функциональных, а последних от структурных закономерностей, корнем которой является принцип коммуникативности. Наличие такой зависимости общесистемных закономерностей доказывает связь принципа организационной

непрерывности с принципом моноцентризма, который целесообразно рассматривать более широко, чем это было предложено А. Богдановым.

Полученные результаты показывают возможность и целесообразность построения формализованной системной теории на основе системно-объектного подхода «Узел-Функция-Объект».

Работа поддержана грантом РФФИ 18-07-00356а.

Список литературы

1. Общая теория систем URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Общая_теория_систем (20.04.2018).
2. Прангишвили И.В. Системный подход и общесистемные закономерности. – М.: СИНТЕГ, 2000. – 528с.
3. Маторин С.И., Зимовец О.А., Жихарев А.Г. Общесистемные принципы в терминах системно-объектного подхода «Узел-Функция-Объект» // Труды ИСА РАН. – 2016. – №1. – Том 66. – С. 10-17.
4. Маторин С.И., Жихарев А.Г., Зимовец О.А. Обоснование взаимосвязей общесистемных принципов и закономерностей с позиции системно-объектного подхода // Труды ИСА РАН. – 2017. – №3. – Том 67. – С. 54-63.
5. Жихарев А.Г., Маторин С.И., Маматов Е.М., Смородина Н.Н. О системно-объектном методе представления организационных знаний // Научные ведомости БелГУ. Сер. Информатика. – 2013. – №8(151). – Выпуск №26/1. – С. 137-146.
6. Жихарев А.Г., Маторин С.И., Зайцева Н.О. Системно-объектный инструментарий для имитационного моделирования технологических процессов и транспортных потоков // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2015. – №4. – С. 95-103.
7. Abadi Martin and Luca Cardelli A. Theory of Objects. – Springer-Verlag. – 1996. – 397 p.
8. Мельников Г.П. Системология и языковые аспекты кибернетики. – М.: Сов.радио, 1978. – 368 с.
9. Богданов А.А. Тектология: Всеобщая организационная наука. Сост., предисловие и комментарии Г.Д. Гловели, послесловие В.В. Попкова. – М.: «Финансы», 2003. – 496с.
10. Маторин С.И., Соловьева Е.А. Детерминантная модель системы и системологический анализ принципов детерминизма и бесконечности мира // НТИ. Сер. 2. 1996. N8. С. 1-8.
11. Маторин С.И., Жихарев А.Г., Зимовец О.А. Исчисление объектов в системно-объектном методе представления знаний // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2017. – №3. – С. 95-106.

References

1. Obshhaja teorija sistem [General theory of systems]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Общая_теория_систем (accessed April 20, 2018).
2. Prangishvili I.V. 2000. Sistemnyj podhod i obshhesistemnye zakonomernosti [System approach and system-wide regularities]. M.: SIN-TEG. 528.
3. Matorin S.I., Zimovec O.A., Zhikharev A.G. 2016. Obshhesistemnye principy v terminah sistemno-ob'ektnogo podhoda «Uzel-Funkcija-Ob'ekt» [System-wide principles in terms of the system-object approach "Node-Function-Object"]. Trudy ISA RAN [Proceedings of the Institute of System Analysis of the Russian Academy of Sciences]. 1(66): 10-17.
4. Matorin S.I., Zhikharev A.G., Zimovets O.A. 2017. Obosnovanie vzaimosvyazei obshchesistemnykh printsipov i zakonomernostei s pozitsii sistemno-ob'ektnogo podkhoda [Substantiation of the interrelationships of system-wide principles and regularities from the standpoint of a systematic, object-oriented approach]. Trudy ISA RAN [Proceedings of the Institute of System Analysis of the Russian Academy of Sciences] 3(67): 54-63.
5. Zhikharev A.G., Matorin S.I., Mamatov E.M., Smorodina N.N. 2013. O sistemno-ob'ektnom metode predstavleniya organizatsionnykh znaniy [On the system-object method of representing organizational knowledge]. Nauchnye vedomosti BelGU. Ser. Informatika [Scientific bulletins of the Belgorod State University. Informatics series] 8(26): 137-146.
6. Zhikharev A.G., Matorin S.I., Zajceva N.O. 2015. Sistemno-ob'ektnyj instrumentarij dlja imitacionnogo modelirovaniya tehnologicheskikh processov i transportnyh potokov [System-object tools for simulation modeling of

technological processes and transport flows]. *Iskusstvennyy intellekt i prinjatie reshenij* [Artificial Intelligence and Decision Making] 4: 95-103.

7. Abadi Martin and Luca Cardelli A. *Theory of Objects*. – Springer-Verlag. – 1996. – 397p.

8. Mel'nikov G.P. 1978. *Sistemologiya i yazykovyye aspekty kibernetiki* [Systemology and language aspects of cybernetics]. M.: Sov. Radio. 368.

9. Bogdanov A.A. 2003. *Tektologiya: Vseobshhaya organizacionnaya nauka* [Tectology: General Organizational Science]. M.: «Finansy». 496.

10. Matorin S.I., Solov'eva E.A. 1996. *Determinantnaya model' sistemy' i sistemologicheskiy analiz principov determinizma i beskonечnosti mira* [The determinant model of the system and the systemological analysis of the principles of determinism and the infinity of the world]. NTI. Ser. 2 [Scientific and technical information. Series 2]. 8: 1-8.

11. Matorin S.I., Zhikharev A.G., Zimovets O.A. 2017. *Ischislenie ob'ektov v sistemno-ob'ektnom metode predstavleniya znaniy* [Objects calculus in the system-object method of knowledge representation]. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie reshenii* [Artificial Intelligence and Decision Making]. 3: 95-106.

Маторин Сергей Игоревич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем и технологий

Жихарев Александр Геннадиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных и робототехнических систем

Белов Сергей Павлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры организации и технологии защиты информации

Matorin Sergey Igorevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information Systems and Technologies

Zhikharev Alexander Gennadievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information and Robotics Systems

Belov Sergey Pavlovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Organization and Technology of Information Protection

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ SYSTEM ANALYSIS AND PROCESSING OF KNOWLEDGE

UDC 658.012.122

DOI: 10.18413/2518-1092-2018-3-2-0-3

Pihnastyi O.M.
Belousova Yu.O.

ABOUT THE STABILITY OF FLOW PARAMETERS
OF A PRODUCTION LINE

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» 79-2 Pushkinskaya, Kharkov, 61102, Ukraine

e-mail: pihnastyi@gmail.com, aizeku1996@gmail.com

Abstract

The model of the technological process for enterprises with the production method of production is investigated. The dynamics of macroparameters of the production process is considered: inter-operational stocks and the rate of processing of subjects of labour on technological operations along the technological route. Balance equations are presented for macroparameters of the technological process, which express differential dependencies between macroparameters. The linearization of the system of balance equations is performed and the equations of the perturbed state for macroparameters of the closed system of balance equations are written down. Criteria of stability for macroparameters of the production system relative to the normative unperturbed state are determined. Conditions of the stability of the production system functioning are presented. The interrelation between the magnitude of the tempo and the magnitude of the inter-operational reserve of basic products is shown, which ensures the stable functioning of the production process. A system of equations for the perturbed state of a production system for a special case of stability theory is considered (the case of one zero root of the characteristic equation of the system).

Keywords: stability of mass production processes functioning; production systems; flow production line; enterprise; business process; basic product; technological chain; distribution function.

УДК 658.012.122

Пигнастый О.М.
Белюсова Ю.О.

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ПОТОКОВЫХ ПАРАМЕТРОВ
ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЛИНИИ

Национальный Технический Университет «ХПИ», ул. Пушкинская, д. 79-2, г. Харьков, 61102, Украина

e-mail: pihnastyi@gmail.com, aizeku1996@gmail.com

Аннотация

Исследуется модель производственного процесса для предприятий с поточным методом организации производства. Рассматривается динамика макропараметров производственного процесса: межоперационных заделов и темпа обработки предметов труда на технологических операциях вдоль технологического маршрута. Представлены балансовые уравнения для макропараметров технологического процесса, которые выражают дифференциальные зависимости между макропараметрами. Выполнена линеаризация системы балансовых уравнений и записаны уравнения возмущенного состояния для макропараметров замкнутой системы балансовых уравнений. Определены критерии устойчивости для макропараметров производственной системы относительно нормативного невозмущенного состояния. Показана взаимосвязь величины темпа и величины межоперационных задела базовых продуктов, которая обеспечивает устойчивое

функционирование производственного процесса. Рассмотрена система уравнений возмущенного состояния производственной системы для особого случая теории устойчивости (случай одного нулевого корня характеристического уравнения системы).

Ключевые слова: устойчивость функционирования процессов массового производства; производственные системы; поточная производственная линия; предприятие; бизнес-процесс; базовый продукт; технологическая цепочка; функция распределения базовых продуктов.

INTRODUCTION

The process of uneven development of the economy, especially its individual parts, fluctuations in the volume of production and sales, the emergence of significant production declines can be characterized as a crisis situation, which should be considered as a general regularity inherent to the market economy. Even a stably developing enterprise in a certain period of time can turn out unable to follow the changes in the market situation and to get into the long-term economic crisis.

The enterprise is a complex system that implements a complete set of dynamic processes, which in theory and practice of organizational management are called business processes. Business process – an amount of different activities containing certain resources (tangible, financial, labor, time, etc.) at the input, products and services (tangible and intangible) – at the output (see Figure 1). The process itself is conversion, which adds cost [1-5].

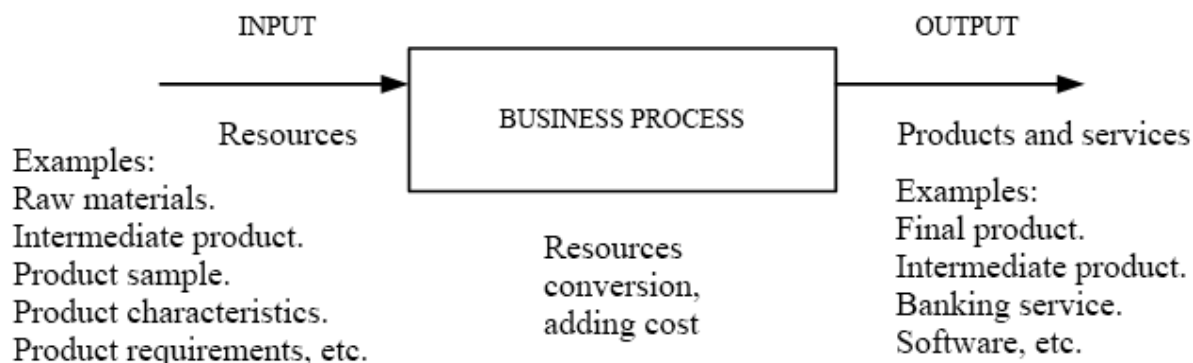


Fig. 1. The presentation of the business process, adopted in the standard ISO 9000

The enterprise as an open system builds its functioning in an essential relationship with the external environment [2, 3]. Therefore, part of the parameters of its business processes, for example, such as product sales volume, tax rates, energy tariffs, market prices, exchange rates, are formed in the external environment and can be interpreted as a demonstration of perturbing factors. Under the perturbing factors there're meant the forces that are not taken into account when describing business processes and, ultimately, affecting the production and output of products. It is known that the impact of these factors on the behavior of the system, which is under consideration, is ambiguous for different business processes: they make an essential impact on some of them, on the other – minor, because the perturbed state differs from the unperturbed not so much. They can act instantly, what comes down to a small change in the initial state of the system, and continuously, i.e. the compiled equations of the business process differ from the true ones by some small correction terms not included in the equations [6,7]. Since the perturbing factors are inevitable, and the presence of dynamic quantities among the parameters of business processes makes the enterprise functioning less manageable and predictable, and the possibility of achieving the goal is small, the task of modeling the stable functioning of processes acquires a very important theoretical and practical significance [7-11]. The stability issue gets the particular importance when the bigger accuracy and speed control are needed. K.Kempf points out that minor deviations in the parameters of the flow line for the production

semiconductor products can lead to large deviations in the flow parameters [12]. The experimental data indicate a deviation in the throughput of the production line from the standard value to 20%. The time of the perturbation progress was several weeks.

1. ANALYSIS AND RESEARCH OF PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF THE ARTICLE

The stability research through the business processes parameters of value chains with mass output of products was carried out in the works [8,9,14]. At the same time, the concept of a basic product (BP) was introduced to construct a model of the production process. Basic product – an element of a large system, to which the value is transferred as it moves along the technological chain.

As all the input resources of a business process are basically expressed through costs, the production process will be characterized by the moments of the BP distribution function in terms of the rates of cost changes $\chi(t, S, \mu)$ in the phase space (S, μ) . Here S is the sum of the total costs spent by the enterprise on BP making in the current moment of time; μ – the rate of cost changes. Similar approaches to the systems description were suggested in works [1,16].

Let's write down the production process as a total derivative of the BP distribution function in terms of the rates of cost changes [16,17]:

$$\frac{d\chi(t, S, \mu)}{dt} = \frac{\partial \chi}{\partial t} + \frac{\partial \chi}{\partial S} \mu + \frac{\partial \chi}{\partial \mu} f(t, S) = \lambda_{equip} \{ \psi[\tilde{\mu} \rightarrow \mu] [\chi]_1 - \mu \chi \}, \quad (1)$$

where $f(t, S) = \frac{d\mu}{dt}$ – the function that determines the rate of cost changes of the base product (BP – base product) when it moves along the technological chain of production process [18]; λ_{equip} – equipment density along the technological chain of the production process; $\tilde{\mu} = \mu + \Delta\mu$ – rate of change in BP costs after the impact of technological equipment; $\Delta\mu$ – increase in costs caused by the impact on the BP of technological equipment; $\psi[\tilde{\mu} \rightarrow \mu]$ – the function describing the process of technological equipment impact on BP and determined by its parameters; $[\chi]_1 = \int_0^{\infty} d\mu \cdot \mu \cdot \chi(t, S, \mu)$ – BP motion rate along the technological chain (the first moment of the distribution function) [4,19].

Note that the right side of equation (1) determines the regularities of technological equipment operation during the realization of the production process.

Suppose that [19]

$$\frac{1}{K_v} = \frac{\xi}{\left[\frac{1}{\lambda_{equip}} \right]},$$

where $\frac{1}{\lambda_{equip}}$ characterizes the increase in the cost of BP on a unit of equipment along the entire chain

of technological operations; ξ – step on the variable S , defining its measure unit.

Let us consider the case of an established operating mode of an enterprise with a high density of technological equipment, i.e. $K_v \ll 1$. Multiplying the equation (1) respectively by 1, μ and integrating over the entire range μ , we obtain in zero approximation by the small parameter $K_v \ll 1$ a closed system of equations for describing the production process [14-16]

$$\begin{cases} \frac{\partial [\chi]_0}{\partial t} + \frac{\partial [\chi]_1}{\partial S} = 0; \\ \frac{\partial [\chi]_1}{\partial t} + \frac{\partial [\chi]_2}{\partial S} = f(t, S)[\chi]_0. \end{cases} \quad (2)$$

Getting through the following conditions [20]:

$$\int_0^\infty \psi[\mu \rightarrow \tilde{\mu}] d\tilde{\mu} = 1, \quad J = \sum_{m=0}^\infty (K_v)^m J_m; \quad \lambda_{equip} \{ \psi[\tilde{\mu} \rightarrow \mu] [\chi]_1 - \mu \chi \} = 0; \quad (3)$$

$$\int_0^\infty \mu \psi[\mu \rightarrow \tilde{\mu}] d\tilde{\mu} = \mu_\psi = \frac{[\chi]_{1\psi}}{[\chi]_0}, \quad \int_0^\infty \mu \psi[\mu \rightarrow \tilde{\mu}] d\tilde{\mu} = \int_0^\infty \mu \frac{\mu \chi}{[\chi]_1} d\tilde{\mu} = \frac{[\chi]_2}{[\chi]_1}, \quad (4)$$

where $J = \lambda_{equip} \{ \psi[\tilde{\mu} \rightarrow \mu] [\chi]_1 - \mu \chi \}$, $[\chi]_0 = \int_0^\infty d\mu \chi(t, S, \mu)$ – BP reserves (zero moment of the

distribution function); $[\chi]_2 = \int_0^\infty \mu^2 \chi d\mu$ – the second moment of the BP distribution function; $[\chi]_{1\psi}$ – the equipment operation rate, defined by its passport data.

The following solution satisfies the system of equations (2) for describing the production process [6-8,13,18]

$$[\chi]_0^* = [\chi]_0^*(t, S); \quad [\chi]_1^* = [\chi]_1^*(t, S), \quad (5)$$

$$\text{with initial} \quad [\chi]_0^{init} = [\chi]_0(0, S); \quad [\chi]_1^{init} = [\chi]_1(0, S) \quad (6)$$

$$\text{and boundary} \quad [\chi]_0^{bound} = [\chi]_0(t, 0); \quad [\chi]_1^{bound} = [\chi]_1(t, S_d) \quad (7)$$

conditions, where S_d – the total average cost price of manufacturing the BP on the characteristic section of the production line.

The solution (5) of the equations system is called the production process plan and is a necessary condition for stability. This plan defines the balance between the BP movement along the technological chain and the required output from production.

The purpose of the article is to study the model of the stable functioning of the system's production process in the case of small perturbations affecting it.

2. MAIN MATERIAL

Let the parameters of the production process – tact and reserve – have random small perturbations $[y]_0$, $[y]_1$ relative to its unperturbed position $[\chi]_0^*$, $[\chi]_1^*$, determined by the conditions (5).

We expand these parameters in the neighborhood of the unperturbed position [21, 22]

$$[\chi]_0 = [\chi]_0^* + [y]_0; [\chi]_1 = [\chi]_1^* + [y]_1. \quad (8)$$

Let us linearize the system of equations by small perturbations in the neighborhood of the unperturbed state of the system parameters, expanding the function $f(t, S) \cdot [\chi]_0$ in the neighborhood $[\chi]_0^*, [\chi]_1^*$ [23]:

$$f(t, S)[\chi]_0 = f^*(t, S)[\chi]_0^* + b_1[y]_0 + b_2[y]_1 + \Delta(0^2), \quad (9)$$

where $\Delta(0^2)$ – members of a higher infinitesimal order relatively to perturbations of the production system parameters.

Let us represent the system of equations (2) in the form

$$\begin{aligned} \frac{\partial [\chi]_0^*}{\partial t} + \frac{\partial [\chi]_1^*}{\partial S} &= 0; \\ \frac{\partial [\chi]_1^*}{\partial t} + \frac{\partial [\chi]_1^*}{\partial S} \frac{[\chi]_{1\psi}}{[\chi]_0^*} + \frac{[\chi]_1^*}{[\chi]_0^*} \frac{\partial [\chi]_{1\psi}}{\partial S} - \frac{[\chi]_1^* [\chi]_{1\psi}}{([\chi]_0^*)^2} \frac{\partial [\chi]_0^*}{\partial S} &= f^*(t, S)[\chi]_0^*. \end{aligned} \quad (10)$$

Taking into account the expressions (10), the system of equations of the production system state, linearized with respect to small perturbations $[y]_0, [y]_1$ parameters $[\chi]_0^*$ and $[\chi]_1^*$, write down like this:

$$\begin{aligned} \frac{\partial [y]_0}{\partial t} + \frac{\partial [y]_1}{\partial S} &= 0; \\ \frac{\partial [y]_1}{\partial t} + \frac{\partial [y]_1}{\partial S} B_{\left(\frac{\partial [y]_1}{\partial S}\right)} + [y]_1 B_{([y]_1)} + \frac{\partial [y]_0}{\partial S} B_{\left(\frac{\partial [y]_0}{\partial S}\right)} + [y]_0 B_{([y]_0)} &= 0, \end{aligned} \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} B_{\left(\frac{\partial [y]_1}{\partial S}\right)} &= \frac{[\chi]_{1\psi}}{[\chi]_0^*}, \quad B_{\left(\frac{\partial [y]_0}{\partial S}\right)} = -\frac{[\chi]_1^* [\chi]_{1\psi}}{([\chi]_0^*)^2}, \\ B_{([y]_1)} &= \frac{1}{[\chi]_0^*} \frac{\partial [\chi]_{1\psi}}{\partial S} - \frac{[\chi]_{1\psi}^*}{([\chi]_0^*)^2} \frac{\partial [\chi]_0^*}{\partial S} - b_2, \\ B_{([y]_0)} &= -\frac{\partial [\chi]_1^*}{\partial S} \frac{[\chi]_{1\psi}}{([\chi]_0^*)^2} - \frac{[\chi]_1^*}{([\chi]_0^*)^2} \frac{\partial [\chi]_{1\psi}}{\partial S} + 2 \frac{[\chi]_1^* [\chi]_{1\psi}^*}{([\chi]_0^*)^3} \frac{\partial [\chi]_1^*}{\partial S} - b \end{aligned} \quad (12)$$

The period of the perturbation T_{pert} existence of production indicators in practice usually ranges from several days to several weeks (usually not more than a couple of weeks), while the period of change in coefficients $B_{\left(\frac{\partial [y]_1}{\partial S}\right)}, B_{\left(\frac{\partial [y]_0}{\partial S}\right)}, B_{([y]_1)}, B_{([y]_0)}$ is determined by the strategic management of the enterprise and ranges from several months to several years [24-26]. The last allows us to assume that the introduced coefficients do not depend explicitly on time during the period of the perturbation T_{pert} existence, since the changes in time $\Delta B_{\left(\frac{\partial [y]_1}{\partial S}\right)}, \Delta B_{\left(\frac{\partial [y]_0}{\partial S}\right)}, \Delta B_{([y]_1)}, \Delta B_{([y]_0)}$ of a value of the coefficients $B_{\left(\frac{\partial [y]_1}{\partial S}\right)}, B_{\left(\frac{\partial [y]_0}{\partial S}\right)}, B_{([y]_1)}, B_{([y]_0)}$ for the period of existence of the perturbation T_{pert} of

the production indicators detected by the dispatching service of the enterprise are much smaller than the values of the coefficients themselves:

$$\frac{B\left(\frac{\partial[y]_1}{\partial S}\right)}{T_{pert}} \gg \frac{\partial B\left(\frac{\partial[y]_1}{\partial S}\right)}{\partial t}, \frac{B\left(\frac{\partial[y]_0}{\partial S}\right)}{T_{pert}} \gg \frac{\partial B\left(\frac{\partial[y]_0}{\partial S}\right)}{\partial t}, \frac{B_{(ly)_1}}{T_{pert}} \gg \frac{\partial B_{(ly)_1}}{\partial t}, \frac{B_{(ly)_0}}{T_{pert}} \gg \frac{\partial B_{(ly)_0}}{\partial t}.$$

Thus, we will assume that the coefficients in the partial differential equations depend only on S. We expand the small perturbations $[y]_0$, $[y]_1$ of the parameters $[\chi]_0$ and $[\chi]_1$ in the Fourier series [23]:

$$\begin{aligned} [y]_0 &\approx \{y_0\}_0 + \sum_{j=1}^{\infty} \{y_0\}_j \cdot \sin[k_j \cdot S] + \sum_{j=1}^{\infty} [y_0]_j \cdot \cos[k_j \cdot S]; \\ [y]_1 &\approx \{y_1\}_0 + \sum_{j=1}^{\infty} \{y_1\}_j \cdot \sin[k_j \cdot S] + \sum_{j=1}^{\infty} [y_1]_j \cdot \cos[k_j \cdot S], \end{aligned} \quad (13)$$

where $k_j = \frac{2\pi j}{S_d}$, $\{y_0\}_0$, $\{y_0\}_j$, $[y_0]_j$, $\{y_1\}_0$, $\{y_1\}_j$, $[y_1]_j$ – coefficients $[y]_0$, $[y]_1$.

Substituting $[y]_0$, $[y]_1$ with their expansion into Fourier series (13), we obtain a new form of equations (11):

$$\frac{d\{y_0\}_0}{dt} + \sum_{j=1}^{\infty} \left(\frac{d\{y_0\}_j}{dt} - [y_1]_j k_j \right) \sin[k_j S] + \sum_{j=1}^{\infty} \left(\frac{d[y_0]_j}{dt} + \{y_1\}_j k_j \right) \cos[k_j S] = 0; \quad (14)$$

$$\begin{aligned} &\left(\frac{d\{y_1\}_0}{dt} + B_{(ly)_1} \{y_1\}_0 + B_{(ly)_0} \{y_0\}_0 \right) + \sum_{j=1}^{\infty} \left(\frac{d\{y_1\}_j}{dt} - B_{(ly)_1} [y_1]_j k_j + B_{(ly)_1} \{y_1\}_j - \right. \\ &\left. - \sum_{j=1}^{\infty} B_{(ly)_0} [y_0]_j k_j + B_{(ly)_0} \{y_0\}_j \right) \sin[k_j S] + \sum_{j=1}^{\infty} \left(\frac{d[y_1]_j}{dt} + B_{(ly)_1} \{y_1\}_j k_j + \right. \\ &\left. + \sum_{j=1}^{\infty} B_{(ly)_1} [y_1]_j + B_{(ly)_0} \{y_0\}_j k_j + B_{(ly)_0} [y_0]_j \right) \cos[k_j S] = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Equation (15) must be zero for any values of S. Hence the system of equations for each of the harmonics has the form:

- for $j = 0$

$$\begin{cases} \frac{d\{y_0\}_0}{dt} = 0; \\ \frac{d\{y_1\}_0}{dt} + B_{(ly)_1} \{y_1\}_0 + B_{(ly)_0} \{y_0\}_0 = 0; \end{cases} \quad (16)$$

- for $j > 0$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\{y_0\}_j}{dt} - [y_1]_j k_j = 0; \\ \frac{d[y_0]_j}{dt} + \{y_1\}_j k_j = 0; \\ \frac{d\{y_1\}_j}{dt} - B_{\left(\frac{\partial[y]_h}{\partial S}\right)} [y_1]_j k_j + B_{([y]_h)} \{y_1\}_j - B_{\left(\frac{\partial[y]_b}{\partial S}\right)} [y_0]_j k_j + B_{([y]_b)} \{y_0\}_j = 0; \\ \frac{d[y_1]_j}{dt} + B_{\left(\frac{\partial[y]_h}{\partial S}\right)} \{y_1\}_j k_j + B_{([y]_h)} [y_1]_j + B_{\left(\frac{\partial[y]_b}{\partial S}\right)} \{y_0\}_j k_j + B_{([y]_b)} [y_0]_j = 0; \end{array} \right. \quad (17)$$

with the corresponding characteristic equations:

- for $j = 0$

$$\begin{vmatrix} (\mathcal{G}) & 0 \\ (B_{([y]_b)}) & (B_{([y]_h)} + \mathcal{G}) \end{vmatrix} = \mathcal{G}(B_{([y]_h)} + \mathcal{G}) = 0 \Rightarrow \mathcal{G}_{0_1} = 0; \mathcal{G}_{0_2} = -B_{([y]_h)}; \quad (18)$$

- for $j > 0$; $k_j = \frac{2 \cdot \pi \cdot j}{S_d}$

$$\begin{vmatrix} (\mathcal{G}) & 0 & 0 & (-k_j) \\ 0 & (\mathcal{G}) & (k_j) & 0 \\ (B_{([y]_b)}) & (-B_{\left(\frac{\partial[y]_b}{\partial S}\right)} k_j) & (\mathcal{G} + B_{([y]_h)}) & (-B_{\left(\frac{\partial[y]_h}{\partial S}\right)} k_j) \\ (B_{\left(\frac{\partial[y]_b}{\partial S}\right)} k_j) & (B_{([y]_b)}) & (B_{\left(\frac{\partial[y]_h}{\partial S}\right)} k_j) & (\mathcal{G} + B_{([y]_h)}) \end{vmatrix} = \quad (19)$$

$$= \left\{ \mathcal{G}(\mathcal{G} + B_{([y]_h)}) + k_j (B_{\left(\frac{\partial[y]_b}{\partial S}\right)} k_j) \right\}^2 + \left\{ \mathcal{G} (B_{\left(\frac{\partial[y]_h}{\partial S}\right)} k_j) - k_j (B_{([y]_b)}) \right\}^2 = 0$$

Whence we obtain the quadratic equations:

$$\mathcal{G}^2 + \mathcal{G} \left(B_{([y]_h)} \pm i B_{\left(\frac{\partial[y]_h}{\partial S}\right)} k_j \right) + \left(k_j^2 B_{\left(\frac{\partial[y]_b}{\partial S}\right)} \mp i k_j B_{([y]_b)} \right) = 0, \quad (20)$$

which give the values of the characteristic equation roots:

$$\begin{aligned} g_{j,2} &= -\frac{\left(B_{([y]_h)} + iB_{\left(\frac{\partial[y]_h}{\partial s}\right)} k_j \right)}{2} \pm \sqrt{\frac{\left(B_{([y]_h)} + iB_{\left(\frac{\partial[y]_h}{\partial s}\right)} k_j \right)^2}{4} - \left(k_j^2 B_{\left(\frac{\partial[y]_0}{\partial s}\right)} - k_j B_{([y]_0)} \right)}, \\ g_{j,4} &= -\frac{\left(B_{([y]_h)} - iB_{\left(\frac{\partial[y]_h}{\partial s}\right)} k_j \right)}{2} \pm \sqrt{\frac{\left(B_{([y]_h)} - iB_{\left(\frac{\partial[y]_h}{\partial s}\right)} k_j \right)^2}{4} - \left(k_j^2 B_{\left(\frac{\partial[y]_0}{\partial s}\right)} + i k_j B_{([y]_0)} \right)}. \end{aligned} \quad (21)$$

If the roots of equation (21) have a negative real part ($j > 0$), then the production process is stable with respect to the j th harmonic of the Fourier expansion of the perturbation of the production processes description parameters [21,22].

Let us study the system of equations of the production system state (16), linearized with respect to small perturbations $[y]_0$, $[y]_h$ for the case $j = 0$:

$$\begin{cases} \frac{d\{y_0\}_0}{dt} = 0; \\ \frac{d\{y_1\}_0}{dt} + B_{([y]_h)}\{y_1\}_0 + B_{([y]_0)}\{y_0\}_0 = 0; \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \{y_0\}_0 = c_{\{y_0\}_0} = const; \\ \frac{d\{y_1\}_0}{dt} = -B_{([y]_h)}\{y_1\}_0 + A_{\{y_1\}_0}(c_{\{y_0\}_0}). \end{cases} \quad (22)$$

The system of equations (22) includes the characteristic equation (20) with one zero root $\mathcal{G}_{0_1} = 0$. Such systems in the stability theory belong to the critical cases of the motion stability study, and the case of one zero root $\mathcal{G}_{0_1} = 0$ – to a special case.

The system of equations of the production system state with respect to small perturbations $[y]_0$, $[y]_h$ (22) for the case $j = 0$ has a solution

$$\{y_0\}_0 = c_{\{y_0\}_0} = const, \quad (23)$$

$$\{y_1\}_0 = \delta_{\{y_1\}_0} + \{\tilde{y}_1\}_0(c_{\{y_0\}_0}), \quad \delta_{\{y_1\}_0} = e^{-B_{([y]_h)t}}, \quad \{\tilde{y}_1\}_0(c_{\{y_0\}_0}) = const.$$

The constant $\{\tilde{y}_1\}_0(c_{\{y_0\}_0})$ is defined from equality

$$-B_{([y]_h)} \cdot \{\tilde{y}_1\}_0(c_{\{y_0\}_0}) + A_{\{y_1\}_0}(c_{\{y_0\}_0}) = 0. \quad (24)$$

The trivial solution $\{y_0\}_0 = c_{\{y_0\}_0} = 0$, $\{y_1\}_0 = 0$ is contained in the solution family of the considered system of equations and corresponds to a zero value of the constant $c_{\{y_0\}_0} = 0$ (in this case the system of equations of the production system state with respect to small perturbations $[y]_0$, $[y]_h$ admits an integral – a family of invariant surfaces, on each of which there is a singular point $\{y_0\}_0 = c_{\{y_0\}_0}$, $\{y_1\}_0 = \delta_{\{y_1\}_0} + \{\tilde{y}_1\}_0(c_{\{y_0\}_0})$ [21,22]). The investigated unperturbed steady state of the considered production system (defined by the necessary conditions of the system stability (5)) corresponds to the trivial solution. In the same way other steady states of the considered system correspond to the solution $\{y_0\}_0 = c_{\{y_0\}_0} = const$, $\{y_1\}_0 = \delta_{\{y_1\}_0} + \{\tilde{y}_1\}_0(c_{\{y_0\}_0})$.

Thus, in the special case, the investigated unperturbed state belongs to the family of steady states, which is defined by the system of equations (22). In this case, the unperturbed state is always stable. Then the stability will not be asymptotic. However, any perturbed state sufficiently close to the unperturbed state, not tending to the unperturbed state with $t \rightarrow \infty$, still tends to one of the steady states of the above-mentioned family. In other words, if we use variables $\{y_0\}_0 = c_{\{y_0\}_0}$, $\delta_{\{y_1\}_0}$, then for any equations solution of the disturbed state for which the initial values $\{y_0\}_0|_0 = c_{\{y_0\}_0}$, $\delta_{\{y_1\}_0}|_0$ are sufficiently small, the equalities are correct

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \{y_0\}_0 = c_{\{y_0\}_0}, \lim_{t \rightarrow \infty} \delta_{\{y_1\}_0} = 0,$$

where $c_{\{y_0\}_0}$ – a certain definite constant (depending on the particular perturbed state taken).

All the states of the family $\{y_0\}_0 = c_{\{y_0\}_0} = \text{cons}$, $\{y_1\}_0 = \delta_{\{y_1\}_0} + \{\tilde{y}_1\}_0(c_{\{y_0\}_0})$, sufficiently close to the unperturbed state, possess exactly the same properties as the unperturbed state. The last is a special case of more general Lyapunov theorem about the special case. Thus, the conditions of the production system stability with respect to small perturbations $[y]_0$, $[y]_1$ of the parameters $[\chi]_0$ and $[\chi]_1$ we will write down in the form of the characteristic equation roots real part negativity:

- for $j = 0$:

$$\text{Re}[-B_{([y]_1)}] < 0; \quad (25)$$

for $j > 0$, $k_j = \frac{2 \cdot \pi \cdot j}{S_d}$:

$$\text{Re} \left[-\frac{\left(B_{([y]_1)} + iB_{\left(\frac{\partial [y]_1}{\partial S}\right)} k_j \right)}{2} \pm \sqrt{\frac{\left(B_{([y]_1)} + iB_{\left(\frac{\partial [y]_1}{\partial S}\right)} k_j \right)^2}{4} - \left(k_j^2 B_{\left(\frac{\partial [y]_0}{\partial S}\right)} - i k_j B_{([y]_0)} \right)} \right] < 0; \quad (26)$$

$$\text{Re} \left[-\frac{\left(B_{([y]_1)} - iB_{\left(\frac{\partial [y]_1}{\partial S}\right)} k_j \right)}{2} \pm \sqrt{\frac{\left(B_{([y]_1)} - iB_{\left(\frac{\partial [y]_1}{\partial S}\right)} k_j \right)^2}{4} - \left(k_j^2 B_{\left(\frac{\partial [y]_0}{\partial S}\right)} + i k_j B_{([y]_0)} \right)} \right] < 0. \quad (27)$$

Also note, that investigating the problem of the production process stability we assumed, that the equations of the production system state with respect to small perturbations $[y]_0$, $[y]_1$ of the parameters $[\chi]_0$ and $[\chi]_1$ are analytical in the considered area and the investigating unperturbed movement lies in this area.

CONCLUSION

Thus, the research of the production system stability with mass production was carried out in the article. For a closed system of equations of the production process parameters state, the equations of the

perturbed state of the system are obtained. A system of equations for the perturbed state of a production system for a special case of stability theory is considered (the case of one zero root of the characteristic equation of the system). For the equation of the perturbed state – equation (11), the conditions of the stability of the production system functioning are obtained – equations (25) – (27). Such approach allows us – through the coefficients $B\left(\frac{\partial[y]_1}{\partial S}\right)$, $B\left(\frac{\partial[y]_0}{\partial S}\right)$, $B([y]_1)$, $B([y]_0)$ – to determine the relationship between

the reserve, BP rate and parameters of the technological equipment, and therefore, to find the necessary equipment characteristics and necessary parameters of the technological process that ensure stable operation of the production.

References

1. Pihnastyi O.M. Network model of a multi-resource production line // Research Result. Information Technologies. 2016. № 2. P. 31-45.
2. Prytkin B.V. Technical and economic production analysis. M.: UNITY-DANA, 2000. 399 p.
3. Prangishvili I.V. Entropy and other system regularities: Questions of complex systems control. M.: Nauka, 2003. 428 p.
4. Demutskiy V.P., Pihnastaya V.S., Pihnastyi O.M. Stochastic description of economic-production systems with mass production // Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2005. № 7. P. 66-71.
5. Fedyukin V.K. Process Quality Management. St. Petersburg: Piter, 2004. 204 p.
6. Pihnastyi O.M. On the issue of ensuring the asymptotic stability of technological process macro-parameters // Matematychni modelyuvannya. 2010. № 2 (23). P. 25-31.
7. Pihnastyi O.M., Khodusov V.D. Stable functioning of the production and technical system through the selection of macro parameters // Matematychni modelyuvannya. Informatsiyni tekhnolohiyi. Avtomatyzovani systemy upravlinnya. 2010. № 890. P. 178-186.
8. Pihnastyi O.M., Zaruba V.Ya., Novak S.N. Analysis of the stability of macroparameters of the technological process of the production and technical system // Problemy i perspektyvy rozvytku bankivs'koyi systemy Ukrayiny. 2009. № 27 P. 200-206.
9. About the stability of mass production processes functioning / Demutskiy V.P., Pihnastyi O.M., Meleshenko S.Yu., Pishchik E.N. // Otkrytyye informatsionnyye i komp'yuternyye integrirovannyye tekhnologii. 2005. № 28. P. 206-215.
10. Raskin L.G., Pustovoytov P.E. Solution of multiproduct task of inventory management by probability criterion // Sistemnyy analiz, upravleniye, informatsionnyye tekhnologii. 2002. № 13. P. 49-53.
11. Planning of discrete production in the conditions of ACS / Shkurba V.V. and others. K.: Tehnika, 1975. 296 p.
12. Kempf K.G. Simulating Semiconductor Manufacturing Systems: Successes, Failures and Deep Questions. (In Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers). Piscataway, New Jersey, 1996. P. 3-11.
13. Demutskiy V.P., Pihnastyi O. M., Questions of stability of macroscopic parameters of mass production technological processes // Dopovidi Nacional'noi akademii nauk Ukraïni. 2006. № 3. P. 63-67.
14. Demutskiy V.P., Pihnastaya V.S., Pihnastyi O. M. Theory of the enterprise: Stability of the mass production functioning and promotion of products to the market. Kharkiv: KhNU, 2003. 272 p.
15. Pihnastyi O.M. Distinctive numbers of production systems functioning description // Problems of Atomic science and technology. 2007. № 3. P. 322-325.
16. Pihnastyi O. M. About a new class of dynamic models of production systems flow lines // Belgorod State University Scientific bulletin. 2014. № 31/1. P. 147-157. Available at: <https://goo.gl/9k3v1r>
17. Pihnastyi O.M. The construction a kinetic equation of the production process // Automated technologies and production. 2016. № 1(11). P. 10-17. Available at: <https://goo.gl/FeS9fa>
18. Pihnastyi O. M. Engineering and production function of the enterprise with serial or mass production // Voprosy proyektirovaniya i proizvodstva konstruksiy letatel'nykh apparatov. 2005. № 42(3). P. 111-117.

19. Pihnastyi O.M. Statistical validity and derivation of balance equations for the two-level model of a production line // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol 5. № 4 (83). P. 17-22. Available at: <https://goo.gl/4Jwn2r>
20. Pihnastyi O. M. Statistical theory of production systems. Kharkiv: KhNU, 2007. 388 p. Available at: <https://goo.gl/dzcEZk>
21. Lyapunov A.M. The general problem of motion stability. M.: Gostekhizdat, 1950. 395 p.
22. Malkin I.G. Theory of motion stability. M.: Nauka, 1966. 531 p.
23. Myshkis A. D. Lectures on Higher Mathematics. M.: Nauka, 1969. 640 p.
24. Lysenko Yu.G., Rumentsev N.V. Modeling of technological flexibility of production and economic systems. Donetsk: DonDU, 2007. 238 p.
25. Vlasov V.A., Tikhomirov I.A., Loktev I.I. Modeling of technological processes of industrial products manufacturing. Novosibirsk: GTPU, 2006. 300 p.
26. Letenko V.A., Rodionov B.N. Organization, planning and management of a machine-building enterprise. Intrafactory planning. Part 2. M.: Vysshaya shkola, 1979. 232 p.

Список литературы

1. Пигнастый О.М. Сетевая модель многоресурсной поточной производственной линии // Научный результат. Серия «Информационные технологии». 2016. № 2. С. 31-45.
2. Прыткин Б.В. Техничко-экономический анализ производства. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2000. 399 с.
3. Прангишвили И.В. Энтропийные и другие системные закономерности: Вопросы управления сложными системами. М.: Наука, 2003. 428 с.
4. Демуцкий В.П., Пигнастая В.С., Пигнастый О.М. Стохастическое описание экономико-производственных систем с массовым выпуском продукции // Доповіді Національної академії наук України. 2005. № 7. С. 66-71.
5. Федюкин В.К. Управление качеством процессов. СПб: Питер, 2004. 204 с.
6. Пигнастый О.М. К вопросу обеспечения асимптотической устойчивости макропараметров технологического процесса // Математичне моделювання. 2010. № 2 (23). С. 25-31.
7. Пигнастый О.М., Ходусов В.Д. Устойчивое функционирование производственно-технической системы за счёт выбора макропараметров // Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. 2010. № 890. С. 178-186.
8. Пигнастый О.М., Заруба В.Я., Новак С.Н. Анализ устойчивости макропараметров технологического процесса производственно-технической системы // Проблеми і перспективи розвитку банківської системи України. 2009. № 27 С. 200-206.
9. Об устойчивости функционирования процессов массового производства / Демуцкий В.П., Пигнастый О.М., Мелешенко С.Ю., Пищик Е.Н. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2005. № 28. С. 206-215.
10. Раскин Л.Г., Пустовойтов П.Е. Решение многономенклатурной задачи управления запасами по критерию вероятности // Системный анализ, управление, информационные технологии. 2002. № 13. С. 49-53.
11. Планирование дискретного производства в условиях АСУ / Шкурба В.В. и др. К.: Техника, 1975. 296 с.
12. Kempf K.G. Simulating Semiconductor Manufacturing Systems: Successes, Failures and Deep Questions. (In Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers). Piscataway, New Jersey, 1996. P. 3-11.
13. Демуцкий В.П., Пигнастый О. М., Вопросы устойчивости макроскопических параметров технологических процессов массового производства // Доповіді Національної академії наук України. 2006. № 3. С. 63-67.
14. Демуцкий В.П., Пигнастая В.С., Пигнастый О.М. Теория предприятия: Устойчивость функционирования массового производства и продвижения продукции на рынок. Харьков: ХНУ, 2003. 272 с.
15. Pihnastyi O.M. Distinctive numbers of production systems functioning description // Problems of Atomic science and technology. 2007. № 3. P. 322-325.

16. Пигнастый О.М. О новом классе динамических моделей поточных линий производственных систем // Научные ведомости Белгородского государственного университета. 2014. № 31/1. С. 147-157. Available at: <https://goo.gl/9k3v1r>
17. Pihnastyi O.M. The construction a kinetic equation of the production process // Автоматизированные технологии и производства. 2016. № 1(11). С. 10-17. Available at: <https://goo.gl/FeS9fa>
18. Пигнастый О. М. Инженерно-производственная функция предприятия с серийным или массовым выпуском продукции // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. 2005. № 42(3). С. 111-117.
19. Pihnastyi O.M. Statistical validity and derivation of balance equations for the two-level model of a production line // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol 5. № 4 (83). P. 17-22. Available at: <https://goo.gl/4Jwn2r>
20. Пигнастый О.М. Статистическая теория производственных систем. Харьков: ХНУ, 2007. 388 с. Available at: <https://goo.gl/dzcEZk>
21. Ляпунов А.М. Общая задача устойчивости движения. М.: Гостехиздат, 1950. 395 с.
22. Малкин И.Г. Теория устойчивости движения. М.: Наука, 1966. 531 с.
23. Мышкис А. Д. Лекции по высшей математике. М.: Наука, 1969. 640 с.
24. Лысенко Ю.Г., Руменцев Н.В. Моделирование технологической гибкости производственно-экономических систем. Донецк: ДонДУ, 2007. 238 с.
25. Власов В.А., Тихомиров И.А., Локтев И.И. Моделирование технологических процессов изготовления промышленной продукции. Новосибирск: ГТПУ, 2006. 300 с.
26. Летенко В.А., Родионов Б.Н. Организация, планирование и управление машиностроительным предприятием. Внутризаводское планирование. Часть 2. М.: Высшая школа, 1979. 232 с.

Pihnastyi Oleh Mikhailovich, Professor of Department of distributed information systems and cloud technologies, National Technical University "KhPI", Doctor of Engineering

Belousova Yuliia Olehovna, Engineer of Department of distributed information systems and cloud technologies, National Technical University "KhPI"

Пигнастый Олег Михайлович, профессор кафедры распределенных информационных систем и облачных технологий, Национальный технический университет "ХПИ", доктор технических наук

Белоусова Юлия Олеговна, инженер кафедры распределенных информационных систем и облачных технологий, Национальный технический университет "ХПИ"

УДК 519.876.5

DOI: 10.18413/2518-1092-2018-3-2-0-4

Егоров И.А.¹
Маторин С.И.²
Жихарев А.Г.¹
Зайцев А.Н.¹

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ В СИСТЕМНО-ОБЪЕКТНЫХ МОДЕЛЯХ

¹) Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы д. 85,
г. Белгород, 308015, Россия

²) Белгородский университет кооперации, экономики и права, ул. Садовая, д. 116а,
г. Белгород, 308023, Россия

e-mail: zhikharev@bsu.edu.ru, 888615@bsu.edu.ru, matorin@bsu.edu.ru

Аннотация

В работе рассматривается решение задачи оптимизации в системно-объектной модели для получения максимальной прибыли кондитерской фабрики, которая производит конфеты разных сортов. Построенная имитационная модель представляет собой набор UFO-элементов, которые, в свою очередь, представляют собой части конвейерных линий по производству трех марок конфет. Функциональные узлы описываются с помощью специального языка описания функциональных узлов, позволяющего имитировать работу отдельных подсистем конвейера. На разработанной модели проводится эксперимент для выявления максимальной прибыли и динамики ее получения в результате применения симплекс-метода.

Ключевые слова: функционирующая система; задачи оптимизации; состояние системы; имитационная модель; динамика системы; графоаналитическое моделирование; «UFOModeler».

UDC 519.876.5

Egorov I.A.¹
Matorin S.I.²
Zhikharev A.G.¹
Zaitsev A.N.¹

SOLVING OPTIMIZATION PROBLEMS IN SYSTEM-OBJECT MODELS

¹) Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia

²) Belgorod University of Cooperation, Economics and Law, 116a Sadovaya St., Belgorod, 308023, Russia

e-mail: zhikharev@bsu.edu.ru, 888615@bsu.edu.ru, matorin@bsu.edu.ru

Abstract

The article deals with the problem of the optimization problem in the system-object model for maximum profit confectionery factory that produces different varieties of candy. The built simulation model is a set of UFO-elements, which, in turn, are part of the conveyor lines for the production of three brands of candy. Functional nodes are described using a special language for describing the functional nodes, which allows to simulate the operation of individual subsystems of the conveyor. On the developed model the experiment is carried out to identify the maximum profit and dynamics of its production as a result of the simplex method.

Keywords: the functioning system; optimization problems; a condition of system; imitating model; dynamics of system; graphic-analytical modeling; «UFOModeler».

ВВЕДЕНИЕ

Применение имитационного моделирования часто рассматривается в контексте решения задач оптимизации функционирования различных систем. Как правило, решение подобных задач

сводится к проведению серии экспериментов над имитационной моделью с целью определения оптимальных параметров функционирования системы по заранее заданным критериям оптимальности. На данном этапе, как правило, при реализации имитационной модели разработчики прибегают к использованию методов линейного программирования. Применение методов линейного программирования в моделировании позволяет отслеживать из множества возможных решений наиболее приемлемое с точки зрения экономической и технологической составляющих. При этом процесс оптимизации состоит в поиске экстремума (минимума или максимума) целевой функции при наличии ограничивающих равенств или неравенств.

Рассмотрим, какое влияние может оказать оптимизация на производство с экономической точки зрения, выбрав в качестве примера следующую оптимизационную задачу линейного программирования [Балдин и др., 2013]: кондитерская фабрика выпускает три марки конфет: «Сласть», «Ласточка», «Ромашка». Для выпуска продукции используются три вида ингредиентов: какао, молоко, сахар. Запасы ингредиентов ограничены: какао имеется в количестве 2660 единиц, молоко – в количестве 2000 единиц, сахар – в количестве 3030 единиц. Известны нормы расхода ингредиентов на единицу продукции. Для выпуска одной конфеты «Сласть» требуется 2 единицы какао, 1 единица молока, 3 единицы сахара. Для выпуска конфеты «Ласточка» требуется 1 единица сырья какао, 3 единицы молока, 4 единицы сахара. Для выпуска конфеты «Ромашка» требуется 3 единицы какао, 2 единицы молока, 1 единица сахара. Известна прибыль от реализации одной конфеты каждой марки: «Сласть» приносит прибыль в размере 20 у.е., «Ласточка» – в размере 24 у.е., «Ромашка» – в размере 28 у.е. Требуется определить оптимальное количество выпуска конфет трех марок, исходя из ограничений по запасам ингредиентов, чтобы прибыль от их реализации была максимальной.

РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМНО-ОБЪЕКТНОЙ МОДЕЛИ

Для демонстрации процесса выпуска продукции построим системно-объектную имитационную модель технологического процесса по производству кондитерских изделий с применением программного инструментария «UFOModeler».

Создаваемая модель является интерфейсной, то есть может рассматриваться как функция объекта более высокого яруса (т.е. надсистемы). При этом связи данной системы с другими системами – функциональные, связи между подсистемами данной системы – поддерживающие [Алексеева, 2014].

Для описания связей разрабатываемой модели опишем множество потоковых объектов L , которое состоит из элементов l_n , где l_n – потоковые объекты (связи), а множество R содержит элементы r_n , обозначающие поля потоковых объектов, согласно положениям СОМПЗ [Маторин и др., 2017]. Множество L при этом примет вид:

$$L = \{l_1 = [r_1^1], l_2 = [r_2^1], l_3 = [r_3^1], l_4 = [r_4^1], l_5 = [r_5^1]\}, \quad (1)$$

где:

- l_1 – потоковый объект «сахар»;
- l_2 – потоковый объект «молоко»;
- l_3 – потоковый объект «какао»;
- l_4 – потоковый объект «конфеты»;
- l_5 – потоковый объект «прибыль».

При этом представим элементы множества R в виде пар: $r_n^{kn} = [\text{идентификатор}, \text{значение}]$. Тогда по условию задачи, множество R примет следующий вид:

$$R = \{r_1^1 = [\text{колво}, 2660], r_2^1 = [\text{колво}, 2000], r_3^1 = [\text{колво}, 3030], r_4^1 = [\text{штук}, 0], r_5^1 = [\text{уе}, 0]\} \quad (2)$$

УФО-модель представляет систему, состоящую из специальных узловых объектов, в виде триединой конструкции «Узел-Функция-Объект» (УФО-элемента), где:

- узел – структурный элемент надсистемы в виде перекрестка связей данной системы с другими системами;
- функция – динамический (функциональный) элемент надсистемы, выполняющий определенную роль с точки зрения поддержания надсистемы путем балансирования связей данного узла;
- объект – субстанциальный элемент надсистемы, реализующий данную функцию в виде некоторого материального образования, обладающий конструктивными, эксплуатационными и т.д. характеристиками [Маторин и др, 2017].

Приведем общее функциональное назначение узловых объектов модели. Узел «какао» в качестве входящих связей имеет одноимённую связь, а в качестве исходящих – имеет три связи с порядковыми номерами «какао1», «какао2», «какао3». Объектом узла является «раздаточная лента Какао». Функция данного объекта распределяет ингредиенты для всех марок конфет согласно условию задачи. Узловые объекты «молоко», «сахар» имеют аналогичные связи и схожее функциональное назначение.

Узел «Сласть» в качестве входящих имеет связи «какао1», «молоко1», «сахар1», в качестве исходящих – связи «конфеты1» и «прибыль1». Объектом узла является конвейер по созданию конфет марки «Сласть». Функция объекта моделирует изготовление из ингредиентов конфеты, при этом ведется подсчет количества конфет и прибыли от их реализации. Узловые объекты «Ласточка», «Ромашка» имеют аналогичные связи и схожее функциональное назначение.

Рассмотрим программную реализацию функции узлового объекта «Сласть» (рис. 1).

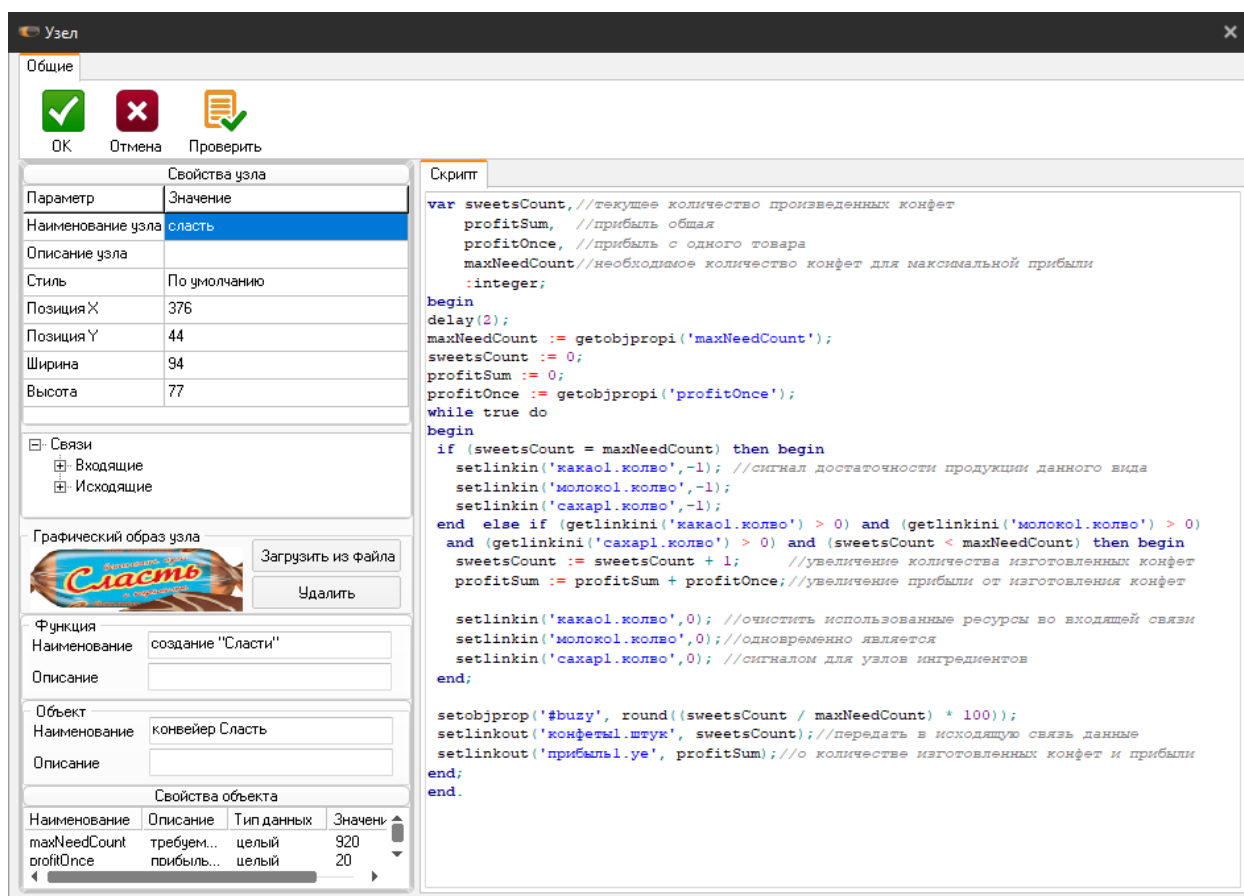


Рис. 1. Программный код функции выпуска конфеты

Fig. 1. Candy release function code

Узел «Конфеты» в качестве входных имеет связи «конфеты1», «конфеты2», «конфеты3», в качестве исходящей используется связь «конфеты». Объектом является счетчик количества конфет. Функция объекта выполняет суммирование всех произведенных конфет.

Для расчета общей прибыли от производства всех конфет используется узловой объект «Прибыль» его функциональность аналогична узловому объекту «Конфеты».

Опишем УФО-элементы разрабатываемой модели s_n через множество S , согласно положениям СОМПЗ [Маторин и др., 2017]:

$$S = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7, s_8\} \quad (3)$$

где:

- s_1 – узловой объект «какао»;
- s_2 – узловой объект «молоко»;
- s_3 – узловой объект «сахар»;
- s_4 – узловой объект «сласть»;
- s_5 – узловой объект «ласточка»;
- s_6 – узловой объект «ромашка»;
- s_7 – узловой объект «конфеты»;
- s_8 – узловой объект «прибыль».

В качестве примера представим элемент s_4 (узловой объект «сласть») в виде совокупности множеств:

$$s_4 = [L_?, L_!; f(L_?)L_!; O_?, O_!, O_f] \quad (4)$$

где:

- $L_?$ – множество входящих потоковых объектов $L_? = \{l_1, l_2, l_3\}$, где l_1 – «какао1», l_2 – «молоко1», l_3 – «сахар1»;
- $L_!$ – множество исходящих потоковых объектов $L_! = \{l_1, l_2\}$, где l_1 – «конфеты1», l_2 – «прибыль1»;
- $f(L_?)L_!$ – метод преобразования входящих потоковых объектов в исходящие (метод представлен на рисунке 1);
- $O_?$ – множество полей интерфейсных входных характеристик объекта (параметров связей) $O_? = \{o_1 = [\text{какао1.колво}, 0], o_2 = [\text{молоко1.колво}, 0], o_3 = [\text{сахар1.колво}, 0]\}$;
- $O_!$ – множество полей интерфейсных выходных характеристик объекта (параметров связей) $O_! = \{o_1 = [\text{конфеты1.штук}, 0], o_2 = [\text{прибыль1.уе}, 0]\}$;
- O_f – множество свойств объекта, реализуемых в методе: «maxNeedCount» – необходимое количество конфет для максимальной прибыли; «profitOnce» – прибыль с одной конфеты.

Проведем эксперимент на модели, выясним, как влияет ограничение количества выпускаемых конфет на получаемую прибыль. Запустим модель на выполнение, в которой каждый конвейер параллельно выпускает конфеты, пока существуют ингредиенты (рис. 2).

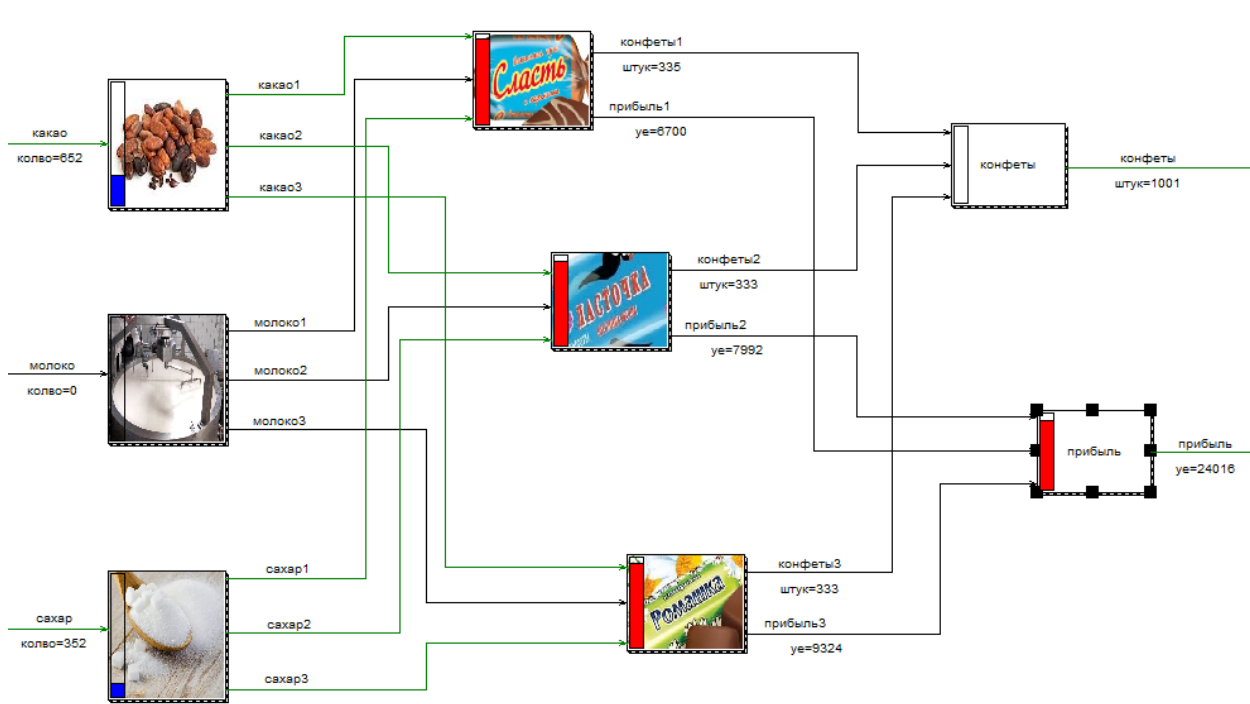


Рис. 2. Результат имитации неоптимизированного производства
Fig. 2. Result of simulation of non-optimized production

Как видно из модели при параллельном производстве было выпущено 335 конфет марки «Сладость», и по 333 конфеты марок «Ласточка» и «Ромашка». При этом прибыль составила 24016 у.е.

ПРИМЕНЕНИЕ СИМПЛЕКС-МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИИ К ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Для нахождения оптимального решения воспользуемся симплекс-методом [Кузнецов и др., 2013]. Вследствие применения данного метода для расчетов мы получили, что максимальная прибыль может составить 25960 у.е. Для этого необходимо наладить выпуск 920 конфет марки «Сладость» и 270 конфет «Ромашка». При этом конфеты марки «Ласточка» выпускать не следует вообще.

Для того чтобы получить максимальную прибыль в модели, зададим выпуск необходимого количества конфет через свойство объектов конвейеров «maxNeedCount» равным найденным значениям (рис. 3).

Объект			
Наименование	Описание		
конвейер Сладость			
Свойства объекта			
Наименование	Описание	Тип данных	Значение
maxNeedCount	требуем...	целый	920
profitOnce	прибыль...	целый	20

Объект			
Наименование	Описание		
конвейер Ласточка			
Свойства объекта			
Наименование	Описание	Тип данных	Значение
maxNeedCount	требуем...	целый	0
profitOnce	прибыль...	целый	24

Объект			
Наименование	Описание		
конвейер Ромашка			
Свойства объекта			
Наименование	Описание	Тип данных	Значение
maxNeedCount	требуем...	целый	270
profitOnce	прибыль...	целый	28

Рис. 3. Установка ограничений на выпуск продукции
Fig. 3. Setting limits on production

Запустим модель на выполнение во второй раз. В результате работы модели получена максимальная прибыль в размере 25960 у.е. Таким образом, при использовании оптимальной модели удалось извлечь дополнительную прибыль в размере 1944 у.е.

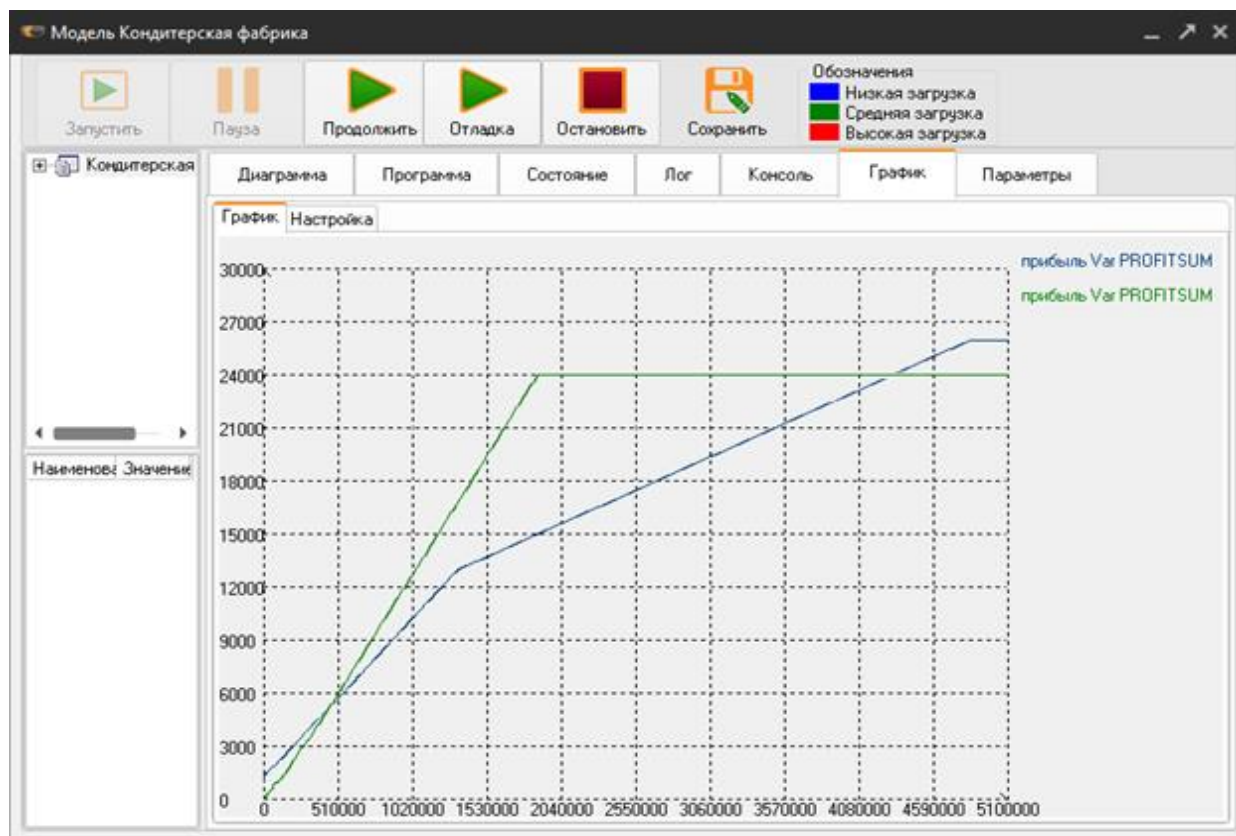


Рис. 4. Сравнение скорости поступления прибыли
Fig. 4. A comparison of the rate of profit

Построим график поступления прибыли в зависимости от времени: зеленым цветом показан выпуск без ограничений на производство продукции, синим цветом график максимальной прибыли при выпуске конфет. Прибыль на графике представлена по оси ординат (рис. 4).

Из графика следует, что при производстве оптимального количества конфет трех марок прибыль была увеличена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Стоит отметить, что динамика роста прибыли отличается в значительной степени, это связано с неравномерной нагрузкой конвейерных линий по производству разных сортов конфет. Фактор времени, как ограничение, в задаче не учитывается, поэтому данное производство является оправданным.

Таким образом, созданная имитационная УФО-модель показывает, что решение, найденное с помощью симплекс-метода, является оптимальным по отношению к выпуску без ограничения по количеству продукции.

Список литературы

1. Zhikharev, A.G., Matorin, S.I., Zaitseva, N.O. 2015. About perspectives of simulation technological processes functioning with using system-object approach node-function-object. International Journal of Applied Engineering Research, 10(12): 31363-31370.
2. Zhikharev A.G., Matorin S.I., Zimovets O.A., Zhikhareva M.S., Rakov V.I. 2016. The simulation modeling of systems taking into account their internal parameters change. International Journal of Pharmacy & Technology, 8(4): 26933-26945.
3. Алексеева, О.А. Теория систем и системный анализ: учебно-методическое пособие / О.А. Алексеева. – Челябинск: НОУВПО РБИУ, 2014. – 245 с.

4. Алиев Р.А. 1990. Производственные системы с искусственным интеллектом. М., Радио и связь.
5. Балдин, К.В. Математическое программирование: Учебник / К.В. Балдин, Н.А. Брызгалов, А.В. Рукусуев / Под общ. ред. д.э.н., проф. К.В. Балдина. – 2-е изд. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и Ко», 2013. – 220 с.
6. Бочеввер Ф.М., Гармонов И.В., Лебедев А.В., Шестаков В.М., 1969. Основы гидрологических расчетов. М., издательство «Недра», 368.
7. Бузов П.А., Жихарев А.Г., Корчагина К.В. 2016. О перспективах имитационного моделирования функционирования систем. Сборник тезисов докладов XLII Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения-2016», Том 1, Москва, 398.
8. Жихарев А.Г., Болгова Е.В., Гурьянова И.В., Маматова О.П. 2014. О перспективах развития системно-объектного метода представления организационных знаний. Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. 1(172): 110-114
9. Жихарев А.Г., Зайцева Н.О., Маторин С.И. 2013. О новом графоаналитическом методе имитационного моделирования Материалы научно-технической конференции «Кибернетика и высокие технологии 21 века» (С&Т*2013), 14-15 мая 2013 г., том 1, 404.
10. Жихарев А.Г., Корчагина К.В., Бузов П.А., Акулов Ю.В., Жихарева М.С. 2016. Об имитационном моделировании производственно-технологических систем. Сетевой журнал Научный результат, серия Информационные технологии. 3(3): 25-31.
11. Жихарев А.Г., Маторин С.И. 2014. Системно-объектное моделирование технологических процессов. Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. 21(192): 137-141.
12. Жихарев А.Г., Маторин С.И., Зайцева Н.О. 2015. Системно-объектное имитационное моделирование транспортных и технологических процессов. Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. 7(204): 159-169.
13. Жихарев А.Г., Маторин С.И., Зайцева Н.О. 2015. Системно-объектный инструментарий для имитационного моделирования технологических процессов и транспортных потоков. Искусственный интеллект и принятие решений. 4: 95-103.
14. Жихарев А.Г., Маторин С.И., Маматов Е.М., Смородина Н.Н. 2013. О системнообъектном методе представления организационных знаний. Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. 8(151): 137-146.
15. Кузнецов А.В., Сакович В.А., Холод Н.И. Высшая математика. Математическое программирование / Под общ. ред. А. В. Кузнецова: Учебник. 4-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2013. – 352 с.
16. Маторин С.И., Жихарев А.Г., Зайцева Н.О., Брусенская И.Н. 2013. Имитационное моделирование транспортных потоков с применением УФО-подхода. Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. 22(165): 148-153.
17. Маторин С.И., Жихарев А.Г., Зимовец О.А. Исчисление объектов в системно-объектном методе представления знаний // Искусственный интеллект и принятие решений. – М.: Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН – 2017. – №3. – С. 104-115
18. Маторин С.И., Жихарев А.Г., Зимовец О.А. 2016. Системно-объектное моделирование адаптации эволюции экономических систем. Вестник Белгородского университета кооперации, экономики и права. 4(60): 81-92.
19. Маторин С.И., Попов А.С., Маторин В.С. 2005. Моделирование организационных систем в свете нового подхода «Узел-Функция-Объект». НТИ. Сер. 2. 1: 1-8.
20. Маторин С.И., Попов Э.В. 2002. Анализ и моделирование бизнес-систем: системологическая объектно-ориентированная технология. Харьков, ХНУРЭ, 322.

References

1. Zhikharev, A.G., Matorin, S.I., Zaitseva, N.O. 2015. About perspectives of simulation technological processes functioning with using system-object approach node-function-object. International Journal of Applied Engineering Research, 10(12): 31363-31370.

2. Zhikharev A.G., Matorin S.I., Zimovets O.A., Zhikhareva M.S., Rakov V.I. 2016. The simulation modeling of systems taking into account their internal parameters change. *International Journal of Pharmacy & Technology*, 8(4): 26933-26945.
3. Alekseeva, O.A. systems Theory and system analysis: textbook / O.A. Alekseeva. – Chelyabinsk: NOUVPO RBIU, 2014. – 245 p.
4. Aliev R.A. 1990. Production systems with artificial intelligence. M., Radio and Communication (in Russian)
5. Baldin, K.V. Mathematical programming: a Textbook / K.V. Baldin, N.A. Bryzgalov, A.V. Rukosuev / Under the General editorship of doctor of Economics, Professor K.V. Baldin. 2nd ed. – Moscow: Publishing and trading Corporation Dashkov & Co., 2013. – 220 p.
6. Bochever F.M., Garmonov I.V., Lebedev A.V., Shestakov V.M. 1969. Fundamentals of hydrological calculations. M., publishing house "Nedra", 368. (in Russian)
7. Buzov P.A., Zhikharev A.G., Korchagina K.V. 2016. On the prospects of simulation of the functioning of systems. Collected theses of the reports of the XLII International Youth Scientific Conference "Gagarin Readings-2016", Volume 1, Moscow, 398. (in Russian)
8. Zhikharev A.G., Bolgova E.V., Guryanova I.V., Mamatova O.P. 2014. On the perspectives of the development of the system-object method of representing organizational knowledge. *Scientific bulletins of the Belgorod State University. Ser. History. Political science. Economy. Information technologies*. 1(172): 110-114 (in Russian)
9. Zhikharev A.G., Zaitseva N.O., Matorin S.I. 2013. On the new graphoanalytical method of imitating modeling Materials of the scientific and technical conference "Cybernetics and High Technologies of the 21st Century" (C & T * 2013), May 14-15, 2013, Volume 1, 404. (in Russian)
10. Zhikharev A.G., Korchagina K.V., Buzov P.A., Akulov Yu.V., Zhikhareva M.S. 2016. On the simulation of production and technological systems. *Network Journal Reserch Result. Information Technology*. 3(3): 25-31. (in Russian)
11. Zhikharev A.G., Matorin S.I. 2014. System-object modeling of technological processes. *Scientific bulletins of Belgorod State University. Ser. History. Political science. Economy. Information technologies*. 21(192): 137-141. (in Russian)
12. Zhikharev A.G., Matorin S.I., Zaitseva N.O. 2015. System-object simulation of transport and technological processes. *Scientific bulletins of the Belgorod State University. History. Political science. Economy. Information technologies*. 7(204): 159-169. (in Russian)
13. Zhikharev A.G., Matorin S.I., Zaitseva N.O. 2015. System-Object Toolkit for Simulation of Technological Processes and Transport Streams. *Artificial Intelligence and Decision Making*. 84: 95-103. (in Russian)
14. Zhikharev A.G., Matorin S.I., Mamatov E.M., Smorodina N.N. 2013. On the system-object method of representing organizational knowledge. *Scientific bulletins of Belgorod State University. Ser. History. Political science. Economy. Information technologies*. 8(151): 137-146. (in Russian)
15. Kuznetsov A.V., Sakovich V.A., Kholod N.I. The higher mathematics. Mathematical programming Under the General editorship of A.V. Kuznetsov: the Textbook. 4th ed. – SPb.: Publishing House "Fallow Deer", 2013. – 352 p.
16. Matorin S.I., Zhikharev A.G., Zaitseva N.O., Brusenskaya I.N. 2013. Simulation modeling of transport streams with application of the UFO approach. *Scientific bulletins of Belgorod State University. Ser. History. Political science. Economy. Information technologies*. 22(165): 148-153. (in Russian)
17. Matorin S.I., Zhikharev A.G., O.A. Zymovets Calculation objects in a system-object method of knowledge representation // *Artificial intelligence and decision-making*. – Moscow: Federal research center "Informatics and management" of RAS – 2017. – No. 3. – P. 104-115.
18. Matorin S.I., Zhikharev A.G., Zimovets O.A. 2016. System-object modeling of the adaptation of the evolution of economic systems. *Bulletin of the Belgorod University of Cooperation, Economics and Law*. 4(60): 81-92. (in Russian)
19. Matorin S.I., Popov A.S., Matorin V.S. 2005. Modeling of organizational systems in the light of the new "Node-Function-Object" approach. *STI. Ser. 2. 1: 1-8* (in Russian)
20. Matorin S.I., Popov E.V. 2002. Analysis and modeling of business systems: a systemological object-oriented technology. Kharkov. KHNURE, 322. (in Russian)

Егоров Илья Александрович, аспирант кафедры прикладной информатики и информационных технологий
Маторин Сергей Игоревич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем и технологий

Жихарев Александр Геннадиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных и робототехнических систем

Зайцев Анатолий Николаевич, аспирант кафедры прикладной информатики и информационных технологий

Egorov Ilya Aleksandrovich, PhD student at the Department of Applied Informatics and Information Technologies

Matorin Sergey Igorevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information Systems and Technologies

Zhikharev Alexander Gennadievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information and Robotics Systems

Zaitsev Anatolij Nikolaevich, PhD student at the Department of Applied Informatics and Information Technologies

УДК 004.75

DOI: 10.18413/2518-1092-2018-3-2-0-5

Кузнецов Д.А.
Офицеров А.И.
Кузнецов А.В.
Чистяков С.В.
Басов О.О.

ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ЗАЛА СОВЕЩАНИЙ

¹⁾ Федеральное государственное казённое военное образовательное учреждение высшего образования «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации», ул. Приборостроительная, д. 35, г. Орёл, 302034, Россия

²⁾ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», Кронверкский пр., д. 49, г. Санкт-Петербург, 197101, Россия

e-mail: wvxp@mail.ru, oficerow@mail.ru, kvaa77@mail.ru, chis_serg@mail.ru, oobasov@mail.ru

Аннотация

Развитие интеллектуальных информационных технологий, позволяющих автоматизировать различные технологические организационные процессы, повлекло за собой разработку и реализацию различных форм интеллектуального пространства. Одной из них стал интеллектуальный зал совещаний. Анализ показал, что большинство существующих прототипов интеллектуального зала совещаний реализуют накопление данных об активности пользователей для упрощения взаимодействия между ними. В предлагаемом авторами прототипе интеллектуального зала совещаний рассматриваются средства повышения комфортности проведения совещания, такие как система климат-контроля, система отображения данных, система сопровождения совещания, система освещения, а также средства реализации требований безопасности при проведении закрытых совещаний. Для чего разработано общее управляющее устройство, осуществляющего автоматическую обработку данных, поступающих с датчиков, камер и микрофонов, запись и чтение данных из базы данных, управление функциональными элементами интеллектуального зала на основе обрабатываемых данных. Предложенный прототип интеллектуального зала совещаний позволит упростить процесс проведения совещания, увеличит возможности по обработке мультимедийной информации, повысит комфортность и приведет к росту продуктивности совещания.

Ключевые слова: интеллектуальное пространство; зал; видеомониторинг; идентификация; автоматизация; аудиообработка; видеообработка.

UDC 004.75

Kuznetsov D.A.
Ofiserov A.I.
Kuznetsov A.V.
Chistykov S.V.
Basov O.O.

THE PREREQUISITES OF CREATION OF THE INTELLECTUAL HALL OF MEETINGS

¹⁾ Federal state military educational institution of higher professional education "Academy of the Federal security service of the Russian Federation", 35 Priboorostroitel'naya St, Orel, 302034, Russia

²⁾ Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 49 Kronverkskiy prospekt, St. Petersburg, 197101, Russia

e-mail: wvxp@mail.ru, oficerow@mail.ru, kvaa77@mail.ru, chis_serg@mail.ru, oobasov@mail.ru

Abstract

Development of the intellectual information technologies allowing to automate various technological organizational processes has caused development and realization of various forms of intellectual space. The intellectual hall of meetings became one of them. The analysis has shown

that the majority of the existing prototypes of the intellectual hall of meetings realize accumulation of data on activity of users for simplification of interaction between them. In the prototype of the intellectual hall of meetings offered by authors means of increase in comfort of holding a meeting, such as system of climate control, system of display of data, system of maintenance of a meeting, system of lighting and also implementer of safety requirements are considered when holding the closed meetings. What the general device which is carrying out automatic data processing, arriving from sensors, cameras and microphones, record and data reading from the database, management of functional elements of the intellectual hall on the basis of the processed data has been developed for. The offered prototype of the intellectual hall of meetings will allow to simplify process of holding a meeting, will increase opportunities for processing of multimedia information, will increase comfort and will lead to growth of efficiency of a meeting.

Keywords: intellectual space; room; video monitoring; identification; automation; audio processing; video processing.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире все большую роль приобретает применение интеллектуальных информационных технологий для автоматизации различных процессов. Следствием развития таких технологий стала разработка и реализация различных форм интеллектуального пространства, таких как «умный дом», «умный офис», «умный автомобиль» и других. Важным элементом интеллектуального пространства являются средства оценки текущей обстановки, необходимой для автоматического принятия решений в режиме реального времени.

Основными средствами оценки текущей ситуации в таких пространствах является аудио- и видеобработка. Их проектирование для залов совещаний требует использования следующих методов [1]:

- распознавание и идентификация лиц [2];
- распознавание речи [3];
- идентификация говорящего [2];
- синтез речи [3];
- определение местоположения источника звука [2];
- определение и слежение за перемещением пользователей на основе видеомониторинга [2].

Также при проектировании необходимо учитывать, что важным условием для комфортного проведения совещания является поддержание требуемого микроклимата [10], а также уровня освещенности и громкости звука окружающего пространства [8,9]. Кроме того, создание интеллектуального пространства немыслимо без автоматизации управления оборудованием зала совещаний.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Сравнительный анализ прототипов интеллектуальных залов совещаний

Функциональность прототипов интеллектуальных залов совещаний рассмотрим, исходя из наличия в них следующих сервисов (таблица 1): интернет-трансляция мероприятия (для обеспечения возможности удаленного слежения за ходом совещания), создание текстовых аудиовизуальных баз данных (для протоколирования совещания), подключение удаленных участников мероприятия (для обеспечения удаленного участия в совещании), автоматическое формирование мультимедийного отчета (сервис обеспечивает возможность просмотра материалов совещания после его завершения), идентификация говорящего участника (для реализации сервисов интеллектуальной помощи выступающему), удаленное управление оборудованием зала (для удобства управления оборудованием зала), автоматическая регистрация участников (сервис обеспечивает защиту от несанкционированного доступа), интеллектуальная помощь выступающему (для удобства проведения доклада), автоматическое управление микроклиматом

(для поддержания комфортных условий в зале), автоматическое управление освещением и громкостью звука (для поддержания комфортных условий в зале).

Таблица 1

Прототипы интеллектуальных залов и реализованные в них сервисы

Table 1

Prototypes of intellectual halls and services implemented in them

Прототипы интеллектуальных залов	Сервисы, реализованные в интеллектуальных залах										
	интернет трансляция мероприятий	создание текстовых аудиовизуальных баз	подключение удаленных участников мероприятий	протоколирование хода мероприятий	идентификация говорящего участника	удаленное управление оборудованием зала	автоматическая регистрация участников	интеллектуальная помощь выступающему	автоматическое управление микроклиматической	автоматическое управление светово-акустической	Система защиты от НСД
UPC	+	+	+	+							
ITC	+	+	+	+	+	+					
TNO	+	+	+	+							
ITSC	+			+							
Idiap	+	+		+							
NIST	+	+	+	+	+						
ПетрГУ	+	+	+			+					
СПИИРАН	+	+	+	+	+	+	+			+	

В настоящее время прототипы интеллектуальных залов исследуются в Политехническом университете Каталонии (UPC), Техническом институте Тренто (ITC) [4], Научно-исследовательском институте человеческих факторов (TNO), Исследовательском институте Idiap (Idiap), Национальном университете стандартов и технологий США (NIST) [5], Центре информационных технологий университета Гонконга (ITSC) [6], Петрозаводском государственном университете (ПетрГУ) [7], Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН) [1].

Рассмотренные прототипы интеллектуальных залов совещаний оснащены аудио- и видеозаписывающим оборудованием, современными устройствами ввода/вывода мультимедийной информации. Такими устройствами являются панорамные камеры, массивы микрофонов, камеры с функциями поворота, наклона и масштабирования, веб-камеры со встроенным микрофоном, проекционные экраны, сенсорные доски. Интеллектуальные залы совещаний содержат сервисы протоколирования, создания текстовых и аудиовизуальных баз данных, интернет-трансляции и идентификации говорящего участника. Однако сервисы автоматической регистрации участников и автоматического управления освещением реализованы лишь в одном прототипе из перечисленных, а сервисы интеллектуальной помощи выступающему, автоматического управления микроклиматом, и громкостью звука и защиты от несанкционированного доступа в рассмотренных залах не реализованы.

Сервисы интеллектуального зала совещаний

С целью устранения выявленных недостатков в разрабатываемом прототипе интеллектуального зала совещаний предполагается реализация следующих систем (таблица 2).

Система климат-контроля предназначена для регулирования температуры и поддержания ее уровня в зале совещаний. Функциональные элементы системы: кондиционер, окна, узлы отопления.

Система отображения данных предназначена для отображения презентации и другой информации, а также для обеспечения управления презентацией. Функциональные элементы системы: сенсорная доска, видеостена, мониторы, планшеты.

Система сопровождения совещания предназначена для обеспечения автоматизированного управления элементами зала совещаний, представления статистической информации председателю совещания и интеллектуальной помощи выступающему. Функциональные элементы системы: камеры полного обзора зала (панорамные камеры), сенсорный экран, микрофоны.

Система контроля и управления доступом предназначена для регистрации участников совещания и контроля их явки. Функциональные элементы системы: камера с микрофоном на входе в зал, двери, оконная сигнализация.

Система освещения предназначена для обеспечения необходимого уровня освещения зала совещаний, а также подсветки необходимых зон системы отображения данных в зависимости от требований выступающего или председателя совещания. Функциональные элементы системы: жалюзи, элементы освещения.

Кроме того, создание интеллектуального зала совещаний требует автоматизации функционирования его элементов. Функционирование систем в предлагаемом прототипе основано на использовании общего устройства управления интеллектуальным залом совещаний, который осуществляет автоматическую обработку данных, поступающих с датчиков, камер и микрофонов, запись и чтение данных из базы данных, автоматическое управление функциональными элементами зала на основе обрабатываемых данных. Также реализована возможность ручного управления функциональными узлами с помощью сенсорных экранов, подключенных к устройству управления, и непосредственных устройств управления элементов.

Таблица 2

Предполагаемые системы в разрабатываемом прототипе интеллектуального зала совещаний

Table 2

Estimated systems in the developed prototype of the intellectual hall of meetings

№ элемента	Системы	Название элемента зала	Функция
1	Система климат-контроля	Кондиционер	Включение/Выключение, регулировка температуры
2		Окна	Открыть/Закрыть, выбор режима проветривания
3		Отопление	Включение/Выключение, регулировка температуры
4	Система отображения данных	Smart Board	Интерактивное управление презентацией
5		Видеостена	Отображение данных
6		Мониторы	Отображение данных
7		Планшеты	Отображение данных
8	Система сопровождения совещания	Камеры полного обзора зала	Регулирование режима освещения, определение активности участников совещания
9		Сенсорный экран	Управление всеми элементами зала
10		Микрофоны в зале	Распознавание речи выступающих
11	Система контроля и управления доступом	Камера на входе в зал	Аутентификация
12		Двери	Открывание/Закрывание

13		Оконная сигнализация	Предотвращение несанкционированного доступа
14	Система освещения	Жалюзи	Развесить/Завесить, повернуть
15		Освещение	Включение/Выключение, регулировка интенсивности

Визуальное представление предлагаемого интеллектуального зала совещаний представлено на рисунке 1.

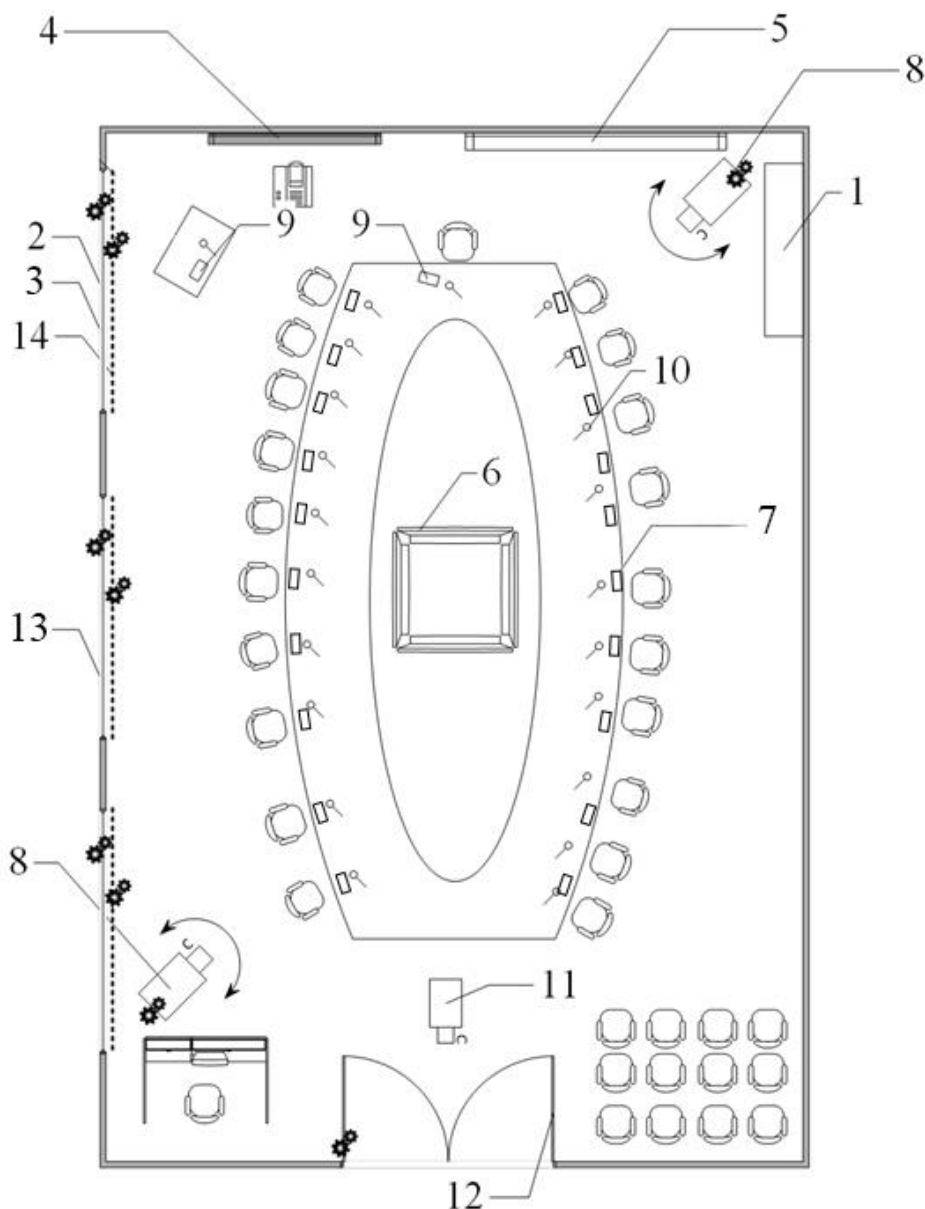


Рис. 1. Визуальное представление интеллектуального зала совещаний

1 – Кондиционер, 2 – Окна, 3 – Отопление, 4 – Smart Board, 5 – Видеостена, 6 – Мониторы, 7 – Планшеты, 8 – Камеры полного обзора зала, 9 – Сенсорный экран, 10 – Микрофоны в зале, 11 – Камера на входе в зал, 12 – Двери, 13 – Оконная сигнализация, 14 – Жалюзи

Fig. 1. Visual representation of the intellectual hall of meetings

1 – Conditioner, 2 – Windows, 3 – Heating, 4 – Smart Board, 5 – Video wall, 6 – Monitors, 7 – Tablets, 8 – Full view cameras, 9 – Touch screen, 10 – Microphones in the hall, 11 – Camera on entry of hall, 12 – Doors, 13 – Windows alarm system, 14 – Blinds

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ существующих интеллектуальных залов совещаний показал, что целью большинства реализованных прототипов является накопление данных об активности пользователей, которые в дальнейшем применяются для упрощения взаимодействия между участниками совещания. В предлагаемом зале помимо средств для достижения указанных целей реализуются средства повышения комфортности проведения совещания, автоматической помощи выступающему, а также выполнения требований безопасности при проведении закрытых совещаний. Эти средства позволят упростить процесс проведения совещания, увеличат возможности по обработке мультимедийной информации, повысят комфортность и приведут к росту продуктивности совещания.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда РФФИ (проект № 18-07-00380).

Список литературы

1. Ронжин Ал.Л. Сравнительный анализ функциональности прототипов интеллектуальных пространств / Ронжин Ал.Л., Карпов А.А. // Труды СПИИРАН. 2013. Вып. 24. С. 277-290.
2. Ронжин Ал.Л. Система аудиовизуального мониторинга участников совещания в интеллектуальном зале / Ронжин Ал.Л., Ронжин Ан.Л. // Доклады ТУСУРа, № 1 (22), ч. 1, 2011. С. 153-157.
3. Кипяткова И.С. Аналитический обзор систем распознавания русской речи с большим словарем / Кипяткова И.С., Карпов А.А. // Труды СПИИРАН. 2010. Вып. 12. С. 7-20.
4. Филлингер А. Промежуточное программное обеспечение и Метрология для Распространяющегося будущего / Хэмчи Ай., Дегре С., Дидач Л., Роуз Т., Фискус Дж., Стэнфорд V // IEEE Распространяющиеся Вычислительные Мобильные и Повсеместные Системы. Издание 8, номер. 3, 2009. С. 74-83.
5. Нэкэшима Х. Руководство по интеллектуальному окружению и Умной окружающей среде / Агэджен Х. К., Аугусто Х. К. // Спрингер. 2010. 1294 стр.
6. Чоу Х. Автоматическая система записи лекции /., Ван Дж., Фух К., Лин С., Чен С. // международная конференция по вопросам Науки систем и инженерии, 2010. С. 167-172.
7. Кадиров Р. Датчики в умной комнате: Предварительное Исследование / Цветков Е., Коржин Д. // конференция Открытая инновационная программа структуры FRUCT, Оулу, Финляндия, 2012. С. 37-42.
8. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий». – Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 2010-15-03 № 20.
9. СанПиН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки» – утв. Постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 1996-31-10 № 36.
10. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях: Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации [2011].
11. РД «Автоматизированные системы. Защита от несанкционированного доступа к информации. Классификация автоматизированных систем и требования по защите информации» – утв. решением председателя Государственной комиссии при Президенте Российской Федерации от 1992-30-03.

References

1. Ronzhin Al. Comparative analysis of functionality of prototypes of intellectual spaces / Ronzhin Al., Karpov A.A. // Works SPIIRAN. 2013. r.24. p. 277-290.
2. Ronzhin A. The system of audiovisual monitoring of participants of the meeting in the intellectual hall / Ronzhin Al., Ronzhin An. // Reports TUSUR, № 1 (22), p. 1, 2011, p. 153-157.
3. Kipyatkova I.S. The state-of-the-art review of systems of recognition of the Russian speech with the big dictionary / Kipyatkova I.S., Karpov A.A. // Works SPIIRAN. 2010. p. 12. p. 7-20.
4. Fillinger A. Middleware and Metrology for the Pervasive Future / Hamchi I., Degre S., Diduch L., Rose T., Fiscus J., Stanford V. // IEEE Pervasive Computing Mobile and Ubiquitous Systems. Vol. 8, num. 3, 2009. pp. 74-83

5. Nakashima H. Handbook of Ambient Intelligence and Smart Environments / Aghajan H. K., Augusto J.C. // Springer. 2010. 1294 p.
6. Chou H. Automated lecture recording system / Wang J., Fuh C., Lin S., Chen S. // International Conference on System Science and Engineering, 2010. pp. 167-172.
7. Kadirov R Sensors in a Smart Room: Preliminary Study / Cvetkov E., Korzun D. // Conf. Open Innovations Framework Program FRUCT, Oulu, Finland, 2012. pp. 37-42.
8. SanPiN 2.2.1/2.1.1.1278-03. Hygienic requirements to the natural, artificial and combined lighting of residential and public buildings. – The resolution of the Chief state health officer of the Russian Federation from 2010-15-03 No. 20.
9. SanPiN 2.2.4/2.1.8.562-96. Noise in workplaces, in rooms of residential, public buildings and in the territory of the housing estate. – app. the resolution of the State Committee on Sanitary and Epidemiology Surveillance of the Russian Federation from 1996-31-10 No. 36.
10. GOST 30494-2011. Buildings inhabited and public. Microclimate parameters to rooms: Interstate scientific and technical commission on standardization [2011].
11. RD «The Automated systems. Protection against unauthorized access to information. Classification of the automated systems and the requirement for information security – app. the decision of the chairman of the State commission under the President of the Russian Federation from 1992-30-03.

Кузнецов Денис Андреевич, студент

Офицеров Александр Иванович, кандидат технических наук, сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации

Кузнецов Андрей Викторович, кандидат технических наук, сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации

Чистяков Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации

Басов Олег Олегович, доктор технических наук, профессор кафедры речевых информационных систем

Kuznetsov Denis Andreevich, student Academy of the Federal security service of the Russian Federation

Ofiserov Aleksandr Ivanovich, candidate of technical sciences, Academy of the Federal security service of the Russian Federation

Kuznetsov Andrey Viktorovich, candidate of technical sciences, Academy of the Federal security service of the Russian Federation

Chistykov Sergey Vladimirovich, candidate of technical sciences, associate professor, Academy of the Federal security service of the Russian Federation

Basov Oleg Olegovich, doctor of technical sciences, Professor of Department of Speech Information Systems

ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ INFORMATION TECHNOLOGIES AND TELECOMMUNICATION

УДК 621.391.8

DOI: 10.18413/2518-1092-2018-3-2-0-6

Белов С.П.¹
Маторин С.И.¹
Белов А.С.²
Рачинский С.А.²
Нетеса В.В.¹

ОБ ОЦЕНКЕ ЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ ОДНОГО КЛАССА ШИРОКОПОЛОСНЫХ ШУМОПОДОБНЫХ СИГНАЛОВ С ЛЧМ

¹⁾ Белгородский университет кооперации, экономики и права, ул. Садовая, д. 116а,
г. Белгород, 308023, Россия

²⁾ Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы д. 85,
г. Белгород, 308015, Россия

e-mail: belovssergei@gmail.com, matorin@bsu.edu.ru, belov_as@bsu.edu.ru, 677110@bsu.edu.ru

Аннотация

В настоящее время в условиях непрерывного увеличения информационного обмена между территориально распределенными абонентами возникает необходимость увеличения эффективности использования частотно-временных ресурсов существующих каналов связи различной физической природы. Однако при использовании в качестве переносчиков информации узкополосных сигналов, особенно в спутниковых системах связи, использующих в качестве ретрансляторов спутники, находящиеся на высокоэллиптической орбите, эффективность использования выделенных частотно – временных ресурсов канала связи значительно снижается из-за большой неопределенности частоты, вызванной эффектом Доплера, и изменений времени прихода принимаемых сигналов. В связи с этим в статье рассматриваются частотные свойства одного класса широкополосных шумоподобных сигналов с ЛЧМ, инвариантного к доплеровскому рассогласованию по частоте, в реальных пределах его изменения. Применение этого сигнала в качестве переносчика информации в указанных системах, позволяет минимизировать затраты частотно-временных ресурсов спутниковых каналов связи за счет эффективного использования выделенной частотной полосы.

Ключевые слова: минимизация затрат частотно-временных ресурсов спутниковых каналов связи; широкополосные шумоподобные сигналы с ЛЧМ; эффект Доплера.

UDC 621.391.8

Belov S.P.¹
Matorin S.I.¹
Belov A.S.²
Rachinsky S.A.²
Netesa V.V.¹

ON ESTIMATION OF FREQUENCY PROPERTIES OF ONE CLASS OF BROADBAND NOISE-LIKE SIGNALS WITH LFM

¹⁾ Belgorod University of Cooperation, Economics and Law, 116a Sadovaya St., Belgorod, 308023, Russia

²⁾ Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia

e-mail: belovssergei@gmail.com, matorin@bsu.edu.ru, belov_as@bsu.edu.ru, 677110@bsu.edu.ru

Abstract

Now, in the conditions of a continuous increase in information exchange between territorially distributed subscribers, there is a need to increase the efficiency of using the time-frequency

resources of existing communication channels of various physical nature. However, when using narrowband signals in satellite communication systems using satellites in a highly elliptical orbit as carriers, the efficiency of using the allocated frequency-time resources of the communication channel is significantly reduced due to the large frequency uncertainty caused by the Doppler Effect and the time variations arrival of received signals. In this connection, the frequency properties of a class of broadband noise-like signals with LFM (BB NL with LFM), invariant to the Doppler mismatch in frequency, are considered in the real range of its variation. The use of this signal as an information carrier in these systems allows minimizing the cost of time-frequency resources of satellite communication channels due to the efficient use of the dedicated frequency band.

Keywords: minimization of costs of time-frequency resources of satellite communication channels, broadband noise-like signals with LFM, Doppler Effect.

ВВЕДЕНИЕ

Классические методы узкополосной модуляции разработаны с целью достижения максимальной спектральной эффективности, т. е. передачи информации с возможно большей скоростью в возможно более узкой полосе частот с одновременным уменьшением уровня интерференционных помех [3].

Однако проблема заключается в том, что с увеличением числа пользователей число каналов, выделенных для информационного обмена, должно возрастать. В то же время, очевидно, что, с одной стороны, общий частотный ресурс является ограниченной величиной, а, с другой стороны, невозможно бесконечно уменьшать полосу частот, в которой осуществляется передача информации. В системах спутниковой связи с узкополосными сигналами, использующих в качестве ретрансляторов спутники, находящиеся на высокоэллиптической орбите, эффективность использования выделенного для передачи частотного ресурса дополнительно снижается за счет того, что при большой неопределенности частоты, вызванной эффектом Доплера и изменениях времени прихода принимаемых сигналов для снижения взаимных помех приходится вводить защитные интервалы по частоте.

Следовательно, повышение эффективности использования выделенной для передачи информации в указанных системах частотной полосы можно достичь при использовании в качестве переносчиков информации модулированных сигналов с расширенным спектром, иначе называемых сигналами с шумоподобным спектром или широкополосными шумоподобными сигналами (ШШС) [1, 9-10]. При этом каждому пользователю выделяются свои кодированные сигналы (коды), в связи с чем, этот режим называется кодовым разделением ресурсов канала связи. [1-5,7].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Математическая модель предлагаемого класса широкополосных шумоподобных сигналов с ЛЧМ (ШШС с ЛЧМ) может быть записана следующим образом:

$$S(t) = \begin{cases} S_0 \cdot \sum_{l=0}^{N-1} \nu_{l+1} \cdot \text{rect} \left\{ \frac{t - l \frac{T}{N}}{T_0} \right\} \cdot \exp \left(j \cdot \left(\omega_0 \cdot \left(t - l \frac{T}{N} \right) + \frac{\mu \left(t - l \frac{T}{N} \right)^2}{2} \right) \right) + \\ + S_0 \cdot \sum_{l=0}^{N-1} (1 - \nu_{l+1}) \cdot \text{rect} \left\{ \frac{t - l \frac{T}{N} - \tau_0}{T_0} \right\} \cdot \exp \left(j \cdot \left(\omega_0 \left(t - l \frac{T}{N} - \tau_0 \right) + \frac{\mu \left(t - l \frac{T}{N} - \tau_0 \right)^2}{2} \right) \right); \\ 0, \text{ при } \left[\frac{N-1}{N} \cdot T + T_0 + (1 - \nu_N) \cdot \tau_0 \right] < t < 0 \end{cases} \quad (1)$$

где S_0 – амплитуда огибающей сигнала, в дальнейшем постоянная величина, равная 1; ν_{l+1} – коэффициент, характеризующий состояние псевдослучайной последовательности (ПСП) и принимающий значения +1 или 0; ω_0 – средняя частота ЛЧМ радиоимпульса; T – длительность информационной посылки; T_0 – длительность ЛЧМ радиоимпульса; τ_0 – величина задержки между началом ЛЧМ радиоимпульса и началом элемента ПСП, соответствующего нулевым значениям коэффициентов ν_{l+1} ;

μ – крутизна модуляционной характеристики ЛЧМ радиоимпульса (скорость изменения частоты), связанная с его девиацией частоты ΔF и длительностью T_0 соотношением $\mu = 2 \cdot \pi \cdot \Delta F / T_0$.

Для исследования частотно-временных характеристик разработанного класса канальных сигналов будем использовать преобразование Фурье [11], которое в математическом виде для этого класса сигналов может быть записано следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{S}(\omega) = & \left\{ \sum_{l=0}^{N-1} \nu_{l+1} \cdot \int_{l \cdot (T/N)}^{l \cdot (T/N) + T_0} \exp \left[j \cdot \left(\omega_0 \cdot t - \omega \cdot l \cdot (T/N) + \mu \cdot t^2 / 2 - \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. - \mu \cdot l \cdot (T/N) \cdot t + \mu \cdot l \cdot (T/N)^2 / 2 - \omega \cdot t \right) \right] \cdot dt + \sum_{l=0}^{N-1} (1 - \nu_{l+1}) \cdot \int_{l \cdot (T/N)}^{l \cdot (T/N) + T_0} \exp \left[j \cdot \left(\omega_0 \cdot t - \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. - \omega_0 \cdot (l \cdot T / N + \tau_0) + \mu \cdot t^2 / 2 - \mu \cdot (l \cdot T / N + \tau_0) \cdot t + \mu \cdot (l \cdot T / N + \tau_0)^2 / 2 - \omega \cdot t \right) \right] \cdot dt \right\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Используя методику, приведенную в [6-7], после ряда преобразований получим:

$$\begin{aligned} \dot{S}(\omega) = & \sqrt{\pi / \mu} \cdot \exp[-j \cdot (\omega_0 - \omega)^2 / (2 \cdot \mu)] \cdot \{C(x_2) - C(x_1) + j \cdot [S(x_2) - S(x_1)]\} \cdot \\ & \cdot \left\{ \sum_{l=0}^{N-1} \nu_{l+1} \cdot \exp[-j \cdot \omega \cdot l \cdot (T / N)] + \sum_{l=0}^{N-1} (1 - \nu_{l+1}) \cdot \exp(-j \cdot \omega \cdot (l \cdot T / N + \tau_0)) \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $x_2 = \frac{\omega_0 - \omega + \Delta \omega}{\sqrt{\pi / \mu}}$, $x_1 = \frac{\omega_0 - \omega}{\sqrt{\pi / \mu}}$.

Как и в [8] представим частотную характеристику исследуемого сигнала в виде следующих трех главных компонент:

- амплитудный спектр

$$\begin{aligned} |\dot{S}(\omega)| = & \sqrt{\pi/\mu} \cdot \left\{ \left[\sum_{l=0}^{N-1} \nu_{l+1} \cdot \cos(\omega \cdot l \cdot T / N) + \sum_{l=0}^{N-1} (1 - \nu_{l+1}) \cdot \cos(\omega \cdot (l \cdot T / N + \tau_0)) \cdot [C(x_2) - C(x_1)] \right] + \right. \\ & + \left[\sum_{l=0}^{N-1} \nu_{l+1} \cdot \sin(\omega \cdot l \cdot T / N) + \sum_{l=0}^{N-1} (1 - \nu_{l+1}) \cdot \sin(\omega \cdot (l \cdot T / N + \tau_0)) \cdot [S(x_2) - S(x_1)] \right]^2 + \\ & + \left\{ \left[\sum_{l=0}^{N-1} \nu_{l+1} \cdot \cos(\omega \cdot l \cdot T / N) + \sum_{l=0}^{N-1} (1 - \nu_{l+1}) \cdot \cos(\omega \cdot (l \cdot T / N + \tau_0)) \cdot [S(x_2) - S(x_1)] - \right. \right. \\ & \left. \left. - \left[\sum_{l=0}^{N-1} \nu_{l+1} \cdot \sin(\omega \cdot l \cdot T / N) + \sum_{l=0}^{N-1} (1 - \nu_{l+1}) \cdot \sin(\omega \cdot (l \cdot T / N + \tau_0)) \cdot [C(x_2) - C(x_1)] \right]^2 \right\}^{1/2}. \end{aligned} \quad (4)$$

где $C(x), S(x)$ – косинус и синус интеграла Френеля, соответственно.

- квадратичный фазовый член

$$\Phi_1(\omega) = (\omega_0 - \omega)^2 / (2 \cdot \mu) \quad (5)$$

- остаточный фазовый член

$$\Phi_2(\omega) = -\arctg \left\{ \frac{A \cdot [S(x_2) - S(x_1)] - B \cdot [C(x_2) - C(x_1)]}{A \cdot [C(x_2) - C(x_1)] + B \cdot [S(x_2) - S(x_1)]} \right\} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} A = & \sum_{l=0}^{N-1} \nu_{l+1} \cdot \cos(\omega \cdot l \cdot T / N) + \sum_{l=0}^{N-1} (1 - \nu_{l+1}) \cdot \cos(\omega \cdot (l \cdot T / N + \tau_0)), \\ B = & \sum_{l=0}^{N-1} \nu_{l+1} \cdot \sin(\omega \cdot l \cdot T / N) + \sum_{l=0}^{N-1} (1 - \nu_{l+1}) \cdot \sin(\omega \cdot (l \cdot T / N + \tau_0)). \end{aligned}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из уравнений (4-6) видно, что временная манипуляция (по задержке) ЛЧМ радиоимпульсов по закону кодирующей последовательности проявляется в изменениях амплитудного спектра и остаточного фазового члена. Интересно отметить, что при $\tau_0 = 0$, выражение (3) отображает частотную характеристику группы из N ЛЧМ радиоимпульсов и преобразуется к виду:

$$\dot{S}(\omega) = \dot{S}_1(\omega) \cdot \sum_{l=0}^{N-1} \exp(-j \cdot \omega \cdot l \cdot T / N), \quad (7)$$

где $S_1(\omega)$ – комплексная частотная характеристика одиночного радиоимпульса.

Из представленных на рисунках 1–2 результатов экспериментальных исследований частотных характеристик исследуемого сигнала при различных значениях базы сигнала ($B = \Delta F \cdot T$) видно, что в результате временной манипуляции (по задержке) ЛЧМ радиоимпульсов по закону ПСП частотная характеристика исходного ЛЧМ радиоимпульса искажается.

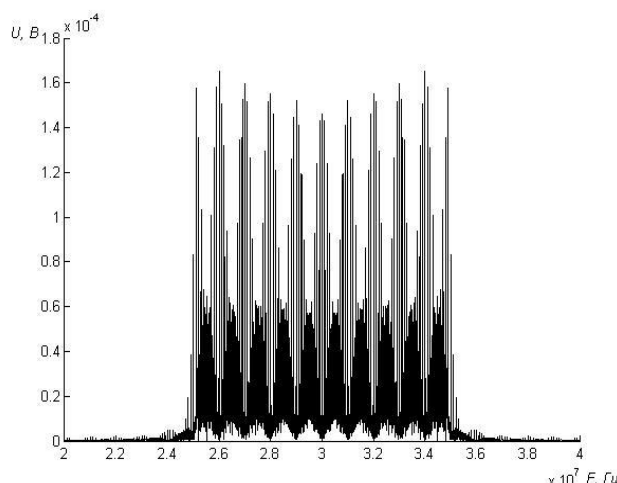


Рис. 1. Амплитудный спектр ШШС с ЛЧМ сигнала, B=100

Fig. 1. Amplitude Spectrum of BB NL signal with LFM, B = 100

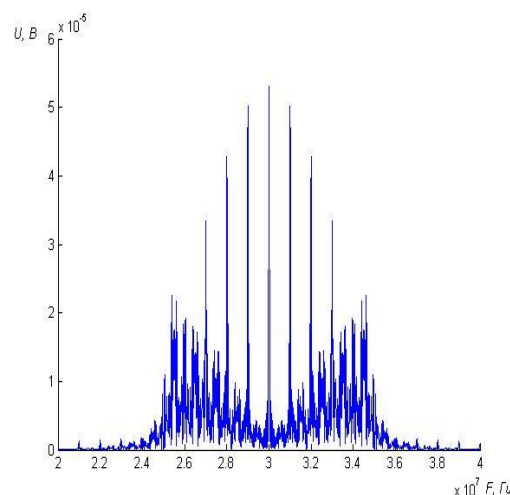


Рис. 2. Амплитудный спектр ШШС с ЛЧМ сигнала, B=20

Fig. 2. Amplitude Spectrum of BB NL of signal with LFM, B = 20

В частности, амплитудный спектр приобретает изрезанный вид и в нем просматриваются «выбросы», возникающие в результате синфазного сложения спектральных составляющих различных ЛЧМ радиоимпульсов. Между главными «выбросами», обусловленными сложением частотных составляющих различных ЛЧМ радиоимпульсов со сдвигом фаз, кратных 2π , находятся второстепенные «выбросы», определяемые суммой значений составляющих отдельных ЛЧМ радиоимпульсов с произвольными фазами. Причем, при увеличении числа элементов кодовой последовательности и постоянном отношении $(\Delta F * T) / N$ общий уровень частотных составляющих увеличивается. Целесообразно отметить, что интенсивные частотные составляющие амплитудного спектра результирующего сигнала располагаются в полосе частот, примерно равной полосе частот исходного ЛЧМ радиоимпульса, кроме того, ширина этого спектра не зависит от величин $(\Delta F * T) / N$ и τ_0 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что применение разработанного класса ШШС с ЛЧМ позволяет минимизировать затраты частотно-временных ресурсов спутниковых систем связи за счет эффективного использования выделенной частотной полосы.

Использование полученных основных соотношений для вычисления спектральных характеристик разработанных ШШС с ЛЧМ позволит в зависимости от требований, предъявляемых к их свойствам, обоснованно выбрать произведение длительности сигнала и ширину занимаемой частотной полосы.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-07-00289

Список литературы

1. Бархота, В.А., Горшков В.В., Журавлев В.И. Системы связи с расширением спектра сигналов // Итоги науки и техники, Связь. – М.: Сов. Радио, 1973. 424 с.
2. Волков, Л.Н., Немировский, М.С., Шинаков, Ю.С. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики. – М.: Эко-Трендз, 2005. 392 с.
3. Галкин, В.А. Цифровая мобильная радиосвязь. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. 432 с.

4. Дятлов, А.П., Дятлов, П.А. Анализ помехоустойчивости обнаружителей связных ЛЧМ сигналов // Специальная техника, 2009. №2. С. 15-22.
5. Зюко, А.Г., Коробов, Ю.Ф. Теория передачи сигналов. – М.: Связь, 1972. – 282 с.
6. Кочемасов, В.Н., Белов, Л.А., Оконешников, В.С. Формирование сигналов с линейной частотной модуляцией. – М.: Радио и связь, 1983. 192 с.
7. Кочемасов, В.Н., Кряжев, В.П., Оконешников, В.С. ЛЧМ сигналы с внутриимпульсной фазовой манипуляцией // Радиотехника, 1980. т. 35. №2. С. 57-60.
8. Кук, Ч., Бернфельд, М. Радиолокационные сигналы. М.: Сов. радио. – 1971. 568с.
9. Прокис, Джон. Цифровая связь / Пер. с англ. под. ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
- 10.Скляр, Бернард. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – М.: издательский дом «Вильямс», 2003. 1104с.
- 11.Харкевич, А.А. Спектр и анализ. – М.: ГИТТЛ. 1952. – 192 с.

References

1. Barhota, V.A., Gorshkov V.V., ZHuravlev V.I. Communication systems with spreading of signals spectrum // Itogi Nauki i Tekhniki, Svyaz. – М.: Sov. Radio, 1973. 424 p.
2. Volkov, L.N., Nemirovskij, M.S., SHinakov, YU.S. Digital radio communication systems: basic methods and characteristics. – М.: ЕНко-Trendz, 2005. 392. p.
3. Galkin, V.A. Digital mobile radio communication. – М.: Goryachaya liniya-Telekom, 2007. 432 p.
4. Dyatlov, A.P., Dyatlov, P.A. An analysis of noise immunity of detectors of connected chirp signals // Special'naya tekhnika, 2009. №2. pp. 15-22.
5. Zyuko, A.G., Korobov, YU.F. Theory of signal transmission. – М.: Svyaz', 1972. – 282 p.
6. Kochemasov, V.N., Belov, L.A., Okoneshnikov, V.S. Formation of signals with linear frequency modulation. – М.: Radio i svyaz', 1983. 192 p.
7. Kochemasov, V.N., Kryazhev, V.P., Okoneshnikov, V.S. Chirp signals with intrapulse phase manipulation // Radiotekhnika, 1980. Vol. 35. №2. pp. 57-60.
8. Cook, C., Bernfeld, M. Radar signals. М.: Sov. radio. – 1971. 568p.
9. Prokis, Dzhon. Digital Communication. with English. under. Ed. D.D. Klovskiy. – М.: Radio i svyaz', 2000. 800 p.
10. Sklyar, Bernard. Digital communication. Theoretical bases and practical application. – М.: izdatel'skij dom «Vil'yams», 2003. 1104p.
11. Harkevich, A.A. Spectrum and analysis. – М.: GITTL. 1952. – 192 p.

Белов Сергей Павлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры организации и технологии защиты информации

Маторин Сергей Игоревич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем и технологий

Белов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационно-телекоммуникационных систем и технологий

Рачинский Сергей Андреевич, аспирант кафедры информационно-телекоммуникационных систем и технологий

Нетеса Вячеслав Владимирович, аспирант кафедры организации и технологии защиты информации

Belov Sergey Pavlovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Organization and Technology of Information Protection

Matorin Sergey Igorevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information Systems and Technologies

Belov Alexander Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies

Rachinsky Sergey Andreevich, post-graduate student of the Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies

Netesa Vyacheslav Vladimirovich, postgraduate student of the Department of Organization and Technology of Information Protection

УДК 621.372

DOI: 10.18413/2518-1092-2018-3-2-0-7

Коваленко В.А.¹
Коваленко А.Н.²

**О ПРИМЕНЕНИИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА
В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ ЭМПИРИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

¹) ООО «Технологии надежности», ул. Королёва, д. 2А, г. Белгород, 308000, Россия

²) Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
ул. Победа, д. 85, г. Белгород, 308015, Россия

e-mail: 578516@bsu.edu.ru

Аннотация

В статье приведен анализ основных методов спектрального анализа как инструмента обработки эмпирических данных. Приведены теоретические основы преобразования Фурье и вейвлет-преобразования (в непрерывной и дискретной формах), описаны преимущества и недостатки данных преобразований. Также приведен краткий анализ применения одномерного преобразования Фурье и кросс-спектрального анализа для обработки временных рядов, отмечены области предпочтительного применения рассмотренных подходов анализа данных. Рассмотрены основные области применения спектрального анализа, более подробно рассмотрены области применения вейвлет-преобразования в медицине и физике. Рассмотренные преобразования широко используются на текущем этапе развития науки и техники, и имеют перспективы применения в различных областях. Показано, что спектральный анализ является эффективным инструментом анализа эмпирических данных.

Ключевые слова: спектральный анализ; вейвлет-анализ; преобразование Фурье; эмпирические данные.

UDC 621.372

Kovalenko V.A.¹
Kovalenko A.N.²

**ON THE APPLICATION OF SPECTRAL ANALYSIS IN PROBLEMS
OF PROCESSING OF EMPIRICAL DATA**

¹) LLC "Reliability Technologies", 2A Koroleva, Belgorod, 308000, Russia

²) Belgorod State National Research University, 85 Pobeda, Belgorod, 308015, Russia

e-mail: 578516@bsu.edu.ru

Abstract

The article analyzes the main methods of spectral analysis as a tool for empirical data processing. The theoretical foundations of the Fourier transform and wavelet transform (in continuous and discrete forms) are presented, advantages and disadvantages of these transformations are described. A brief analysis of the application of a one-dimensional Fourier transform and cross-spectral analysis for the processing of time series is also given, areas of the preferred application of the considered data analysis approaches are noted. The main fields of application of spectral analysis are considered, the areas of wavelet transform application in medicine and physics are considered in more detail. The considered transformations are widely used at the current stage of science and technology development, and they have prospects for application in various fields. It is shown that spectral analysis is an effective tool for empirical data analyzing.

Keywords: spectral analysis; wavelet analysis; Fourier transform; empirical data.

ВВЕДЕНИЕ

Термин «спектральный анализ» в настоящее время имеет расширенный характер и основывается на совокупности методов качественного и количественного определения состава

объекта. Первоначально под спектральным анализом было принято понимать способ определения состава объекта по его спектру. В силу чувствительности метода и быстроты получения результатов он в настоящее время широко применяется в различных сферах обработки эмпирических данных наборов данных, которые были получены в результате наблюдения или эксперимента.

Использование принципов спектрального анализа легло в основу метода анализа данных в частотной области. Исследование свойств эмпирических наборов данных в частотной области называют частотным анализом или гармоническим анализом, осуществляемым в большинстве случаев, на основе преобразования Фурье или вейвлет-анализа.

Спектральный анализ представляет собой метод обработки эмпирических данных, характеризующий частотный состав измеряемого потока данных. Преобразование Фурье выступает математической основой, которая связывает временной набор данных с его представлением в частотной области. Важное место в спектральном анализе занимают методы статистики, так как реальные сигналы могут иметь случайный характер или быть зашумлены при распространении или измерении [1].

Частотное представление функции $f(t)$, определенной на интервале $(-\infty; \infty)$, можно описать следующим образом,

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{f}(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (1)$$

где $\tilde{f}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt$ является гармонической составляющей первоначальной функции $f(t)$, называется прямым преобразованием Фурье функции $f(t)$.

Состояние (1) имеет место лишь в случае абсолютной интегрируемости $f(t)$, т.е. если существует интеграл $\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)| dt$ и $f(t)$ имеет «ограниченную вариацию» (т.е. не может иметь бесконечного числа максимумов и минимумов) для каждого конечного интервала. Существует множество разновидностей этого преобразования [2].

Для построения расчетов и выполнения цифровой обработки наборов эмпирических данных необходимо обладать функциями, которые определены на дискретном множестве точек, периодическом или ограниченном. В этом случае используется дискретное преобразование Фурье, которое представляет функцию (x_k) в виде суммы синусов и косинусов,

$$x_k = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} f_j e^{2\pi i j k / n} \quad k=0, \dots, n-1 \quad (2)$$

где f_j – амплитуды Фурье [3].

Можно выделить ряд недостатков, относящихся к преобразованию Фурье:

1. Преобразование Фурье дает возможность точно определить и характеризовать содержание каждой частоты в наборе данных, но определить во временных рамках момент возникновения и окончания этой частоты не представляется возможным.

2. Затруднен анализ нестационарных потоков, в силу появления шумов, которые обусловлены моментами разрывов или скачков.

3. В преобразовании Фурье отсутствует возможность анализировать частотные характеристики наборов данных в произвольный момент времени.

4. Невозможно обеспечить бесконечно большое число членов ряда для отображения перепадов потоков данных с бесконечной крутизной при построении гармонических базисных функций.

5. При быстрых временных изменениях спектрального состава эмпирических данных отсутствует представление о локальных свойствах набора данных.

6. При анализе данных, которые были получены в результате Фурье-разложения для целей диагностирования, могут возникнуть определенные сложности, для решения которых может потребоваться привлечение опытного специалиста – диагноста.

Перечисленных недостатков лишено вейвлет-преобразование. Оно является более эффективным инструментом, чем преобразование Фурье: есть возможность разложения набора данных в виде компактных базисных функций не только в разрезе частот, но и при сдвигах во времени. Появляется возможность локализовать временные особенности данных, повышается информативность. Термин «вейвлет» в переводе с английского означает маленькая, короткая волна. Вейвлеты – это общее название группы математических функций определенной формы, которые локально определены во времени и по частоте. Множество функций получается из основной базовой функции с помощью сдвигов и растяжений по оси времени [4].

Вейвлет-преобразование является методом, который разбивает данные, функции или операторы на составляющие с разными частотами. Потом каждая из частот изучается и прорабатывается с разрешением, соответствующим выбранному масштабу. Вейвлет-преобразование одномерного набора данных можно представить в виде его разложения по базису, сконструированному из анализирующей функции с помощью масштабирования и переноса. Элементом базиса вейвлет-преобразования является хорошо локализованная функция, быстро спадающая к нулю за пределами небольшого интервала [5].

Прямое вейвлет-преобразование функции $f(x)$ имеет вид

$$W_{\psi}(a,b)f = |a|^{-1/2} \int dt f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3)$$

Здесь параметры сдвига и сжатия a, b непрерывно меняются вдоль R , с ограничением $a \neq 0$.

Концепция непрерывного вейвлет-преобразования обладает некоторыми недостатками. Параметры a и b в формуле (3) меняются непрерывно, что может привести к избыточному представлению спектра сигнала. Как следствие, сравнительно невысокая скорости выполнения преобразования, требующего вычисления интегралов для каждого из значений параметров a и b . Следовательно, наиболее употребительными при вычислительных работах с реальными данными являются дискретные вейвлет-преобразования (ДВП) [6].

Формула для дискретного вейвлет-преобразования получается из формулы (3) в предположении, что a, b принимают только дискретные значения: $a = a_0^m$, $b = nb_0 a_0^m$, m, n пробегает значения из Z , величины $a_0 > 1$, $b_0 > 0$, – фиксированные.

$$W_{\psi}^{m,n}(f) = |a_0|^{-m/2} \int dt f(t) \psi(a_0^{-m}t - nb_0) \quad (4)$$

Разные значения m соответствуют разной ширине вейвлетов, поэтому узкие (высокие частоты) вейвлеты сдвигаются малыми шагами, чтобы покрыть весь временной спектр, в то время как более широкие (низкие частоты) вейвлеты сдвигаются большими шагами [6].

На основе различных преобразований широкое распространение получил также метод анализа временных рядов на основе кросс-спектрального анализа или анализа взаимных спектров.

Спектральный анализ основан на построении периодических моделей данных. Целью этого метода является разложение комплексных временных рядов с циклическими компонентами на несколько основных синусоидальных функций с определенной длиной волн. Спектральный анализ хорошо подходит для распознавания существенных периодических компонентов: в исследуемых временных рядах позволяет выделить определенные повторяющиеся циклы различной длины. Главное отличие спектрального анализа от экспоненциального сглаживания, при использовании которого длина сезонных компонент известна или предполагается, проявляется в возможности распознать сезонные колебания различной длины.

Для моделирования сезонных и циклических колебаний больше всего подходит применение одномерных рядов Фурье. Сезонная компонента временного ряда может быть разложена в ряд

Фурье. Ряды Фурье представляют собой разновидность спектрального анализа. С помощью использования спектрального анализа в структуре временного ряда можно определить пик отклонений от тренда и рассчитать длительность периодической компоненты ряда.

Метод быстрого преобразования Фурье применяют при анализе рядов большой размерности, так как применение данного метода позволяет сократить время выполнения спектрального анализа ряда, а также задач быстрого поиска, быстрого матричного умножения.

Кросс-спектральный анализ является развитым продолжением одномерного анализа Фурье и позволяет анализировать одновременно два ряда. Кросс-спектр определяется для пары стационарных временных рядов и характеризует их взаимодействие на различных частотах.

Вейвлет-преобразования обладают всеми достоинствами преобразований Фурье, кроме того у них есть ряд своих преимуществ:

- Вейвлетные базисы удобнее локализовывать во времени и по частоте;
- Можно рассматривать только те масштабные уровни разложения, которые представляют интерес;
- Среди эмпирических данных локализованных разномасштабных процессов можно выделить определенные масштабные уровни разложения;
- Базисные вейвлеты можно реализовать с помощью функций различной гладкости.

Единственным недостатком является сложность преобразования.

На рисунке 1 представлены области применения спектрального анализа. Далее предметно поясним как именно спектральный анализ применяется в различных областях регистрации эмпирических данных.



Рис. 1. Области применения спектрального анализа
Fig. 1. Areas of application of spectral analysis

В астрофизике спектральный анализ особенно полезен при определении состава атмосферы планеты, позволяет не только установить химический состав соответствующих объектов, но и сопутствующие эмпирические данные: температуру, размер, скорость вращения вокруг оси и особенности движения вокруг общего центра тяжести. В металлургии и машиностроении спектральный анализ выступает в качестве основного инструмента контроля объемов содержания примесей в сырье или в готовой продукции. В геоэкологии спектральный анализ позволяет вести мониторинг изменения показателей, например, гидроэкологического состояния водных объектов [7]. В геологоразведке спектральный анализ стал неотъемлемым инструментом поиска полезных ископаемых, а также быстрого анализа горных пород и сейсмического анализа местности. В археологии спектральный анализ помогает значительно быстрее определить, из каких веществ изготовлена та или иная находка, иногда даже когда именно она сделана.

Вейвлет-преобразование широко используется в целях анализа и прогнозирования климатических факторов. Также можно выделить ещё две укрупненных области применения: медицина и физика (далее рисунок 2 и рисунок 3 соответственно).



Рис. 2. Применение вейвлет-преобразования в медицине
Fig. 2. Application of wavelet transform in medicine

На рисунке 2 графически представлены основные направления в медицине, в которых активно и успешно применяется вейвлет-преобразование. Применение вейвлет-преобразования для анализа эмпирических показателей пульса помогает представить результаты анализа графически, участвует в построении медицинского изображения, что в свою очередь помогает наглядно обозначить значимые для диагностирования признаки. Вейвлет-преобразование часто используется при работе с количественными показателями ЭКГ, позволяет провести фильтрацию показателей, отделить шумы, и даже вынести предположение о постановке диагноза, например, выявить нерегулярные сердечные сокращения. Применение вейвлет-преобразования к анализу эмпирических данных кровяного давления помогает проследить динамику, что также может служить важным показателем при постановке диагноза. Вейвлет-преобразование в электрогастроэнтерографии применяется для построения и отображения зависимостей амплитуды гастросигнала от времени и частоты. Стоит отметить, что вейвлет-преобразование часто применяется при обработке медицинских показателей с целью преобразования в изображение, например, в цифровой маммографии. При исследовании белков вейвлет-преобразование позволяет установить зависимости в последовательностях нуклеотидов, что напрямую связано не только с анализом белков, но с анализом цепочки ДНК [8,9].



Рис. 3. Применение вейвлет-преобразования в физике
Fig. 3. Application of wavelet transform in physics

На рисунке 3 графически отображены основные направления в физике, для которых вейвлет-преобразование является неотъемлемой частью анализа и прогнозирования. Вейвлет-преобразование в оптике применяется для работы с данными об оптических спектрах. Вейвлет-преобразования успешно используются для цифровой обработки эмпирических данных

сейсмической геофизики в качестве инструмента фильтрации различных компонент, например, для распознавания на фоне шума близких по частотным характеристикам сигналов или наоборот для отделения паразитных компонент от общего потока эмпирических данных. Обработка изображений, сигналов и распознавание речи представляют собой самый обширный класс применения вейвлет-преобразования. Преобразование в данном случае участвует не только в привычном понимании обработки. Далее его результаты помогают «научить» технические и интеллектуальные системы распознавать обработанное ранее изображение или речь. Для построения модели квантовой молекулярной динамики процесса вейвлет-преобразование применяют следующим образом: в качестве анализируемого ряда используют эмпирические данные, которые описывали распад ядер тяжелых ионов в одномерном фазовом пространстве. [10]

Таким образом, полагаю, что спектральный анализ является распространенным инструментом анализа свойств наборов эмпирических данных. Многогранность его применения обусловлена отсутствием ограничения выбора между качественными и количественными показателями. Еще одним преимуществом спектрального анализа является возможность двумерного представления одномерного потока данных. В таком случае понятие частота и время рассматривают как независимые переменные. Также преимуществом спектрального анализа является минимальное количество необходимого набора данных для проведения анализа в сравнении с другими методами. Спектральный анализ также представляет собой эффективный инструмент фильтрации, выявления шумов, поэтому часто используется на начальных этапах исследований.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-07-00451.

Список литературы

1. Малоземов В.Н., Машарский С.М. Основы дискретного гармонического анализа. СПб.: НИИММ, 2003. 288 с.
2. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельников Г.М. Численные методы – 4-е изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 636 с.
3. Кристаллинский Р.Е., Кристаллинский В.Р. Преобразования Фурье и Лапласа в системах компьютерной математики М.: Горячая Линия – Телеком, 2012, 216 с.
4. Оценка эффективности различных методов анализа временных диагностических сигналов / Круглова Т.Н., Шурыгин Д.Н., Литвин Д.А., Тарковалин С.А., Власов С.А., Рыженков С.И., Арцебашев В.В. // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 8 (часть 2). С. 237-241.
5. Новиков Л.В. Основы вейвлет-анализа сигналов. Учебное пособие. СПб.: Изд-во ООО "МОДУС+", 1999. 152 с.
6. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. М.: СОЛОН-Р, 2002. 448 с.
7. Черноморец А.А., Болгова Е. В., М.А. Петина М.А. О математических моделях анализа состояния подземных вод горнодобывающего узла // Современные тенденции развития науки и производства: сборник материалов Международной научно-практической конференции (21-22 января 2016 года). Том II. – Кемерово: ЗапСибНЦ, 2016. – С. 275-278.
8. Добеши И. Десятки лекций по вейвлетам. М.: Регулярная и хаотическая динамика, 2001. 364с
9. Успехи и перспективы применения вейвлетных преобразований для анализа нестационарных нелинейных данных в современной геофизике / Филатова А.Е., Артемьев А.Е., Короновский А.А., Павлов А.Н., Храмов А.Е. // Известия высших учебных заведений. 2010. №3 (т.18). С. 3-23.
10. Дейнеко Ж.В. Вейвлет-когерентность как инструмент визуализации сложных физических процессов // URL: https://www.researchgate.net/profile/Zhanna_Deineko/publication/316987269_VEJVLET-KOGERENTNOST_KAK_INSTRUMENT_VIZUALIZACII_SLOZNYH_FIZICESKIH_PROCESSOV/links/591be2420f7e9b7727d8b0c0/VEJVLET-KOGERENTNOST-KAK-INSTRUMENT-VIZUALIZACII-SLOZNYH-FIZICESKIH-PROCESSOV.pdf (дата обращения: 19.04.2018)

References

1. Malozemov V.N., Masharskii S.M. Foundations of Discrete Harmonic Analysis. St. Petersburg: NIIMM, 2003. 288 p.
2. Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobelnikov G.M. Numerical methods – 4 th ed. – M.: BINOMIAL. Laboratory of Knowledge, 2006. 636 pp.
3. Kristalinsky R.E., Kristalinsky V.R. Fourier and Laplace Transformations in Computer Mathematics Systems M.: Hot Line – Telecom, 2012, 216 p.
4. Evaluation of the effectiveness of various methods for analyzing temporal diagnostic signals / Kruglova T.N., Shurygin D.N., Litvin D.A., Tarkovalin S.A., Vlasov S.A., Ryzhenkov S.I., Artsebashev V.V. // Modern high technology. 2016. No. 8 (part 2). P. 237-241.
5. Novikov L.V. Fundamentals of wavelet-analysis of signals. Tutorial. SPb.: Publishing house of "MODUS +" Ltd., 1999. 152 p.
6. Dyakonov V.P. Wavelets. From theory to practice. M.: SOLON-R, 2002. 448 p.
7. Chernomorets A.A., Bolgova E.V., Petina M.A. On mathematical models of the analysis of the state of underground waters of the mining node // Current trends in the development of science and production: a collection of materials of the International Scientific and Practical Conference (January 21-22, 2016). Volume II. – Kemerovo: ZapSibNTS, 2016. – P. 275-278.
8. Dobesi I. Dozens of lectures on wavelets. M: Regular and chaotic dynamics, 2001. 364 p.
9. Successes and perspectives of application of wavelet transformations for the analysis of non-stationary nonlinear data in modern geophysics / Filatova A.E., Artemiev A.E., Koronovskii A.A., Pavlov A.N., Hramov A.E. // News of higher educational institutions. 2010. № 3 (volume 18). P. 3-23.
10. Deineko Zh.V. Wavelet-coherence as a tool for visualization of complex physical processes // URL: https://www.researchgate.net/profile/Zhanna_Deineko/publication/316987269_VEJVLET-KOGERENTNOST_KAK_INSTRUMENT_VIZUALIZACII_SLOZNYH_FIZICESKIH_PROCESSOV/links/591be2420f7e9b7727d8b0c0/VEJVLET-KOGERENTNOST-KAK-INSTRUMENT-VIZUALIZACII-SLOZNYH-FIZICESKIH-PROCESSOV.pdf (date of circulation: April 19, 2018)

Коваленко Валентина Анатольевна, ведущий специалист по тестированию ООО «Технологии надежности»

Коваленко Анастасия Николаевна, старший преподаватель кафедры прикладной информатики и информационных технологий

Kovalenko Valentina Anatolievna, Leading Testing Specialist, Reliability Technologies

Kovalenko Anastasia Nikolaevna, senior lecturer of the Department of Applied Informatics and Information Technologies