МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИЗВЕСТИЯ

Юго-Западного государственного университета

Серия
УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА. МЕДИЦИНСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

№ 1
2011

Курск

№1 2011
Научный рецензируемый журнал

ИЗВЕСТИЯ

ЮГО-ЗАПАДНОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА
Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение

Основан в 2010 г.

Выходит два раза в год

Учредитель: ГОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (ПИ №ФС77-44620 от 15.04.11).

Редакционный совет

С.Г.Емельянов (председатель, главный редактор), д-р техн.наук, профессор, ректор ЮЗГУ;
Л.М. Червяков (зам. председателя), д-р техн. наук, профессор, ЮЗГУ;
Е.А.Кудряшов (зам. председателя), д-р техн.наук, профессор, ЮЗГУ.

В.И.Андреев, д-р техн.наук, профессор, МГСУ, г.Москва; **О.И.Атакищев**, д-р техн.наук, профессор, ЮЗГУ; **Р.К.Боженкова**, д-р филол.наук, профессор, ЮЗГУ; **Ю.В. Вертакова**, д-р экон. наук, профессор, ЮЗГУ; **В.Н.Гридин**, д-р техн.наук, профессор, ЦИТП РАН, Москва; **С.В.Дегтярев**, д-р техн.наук, профессор, ЮЗГУ; **В.Э.Дрейзин**, д-р техн.наук, профессор, ЮЗГУ; **И.А.Каляев**, чл.корр.РАН, д-р техн.наук, профессор, НИИ МВС РАН, Таганрог; **А.Ф.Каперко**, д-р техн.наук, профессор, МГИЭиМ, Москва; **В.И. Колчунов**, академик РААСН, д-р техн. наук, профессор, ОрелГТУ; **Н.А.Кореневский**, д-р техн.наук, профессор, ЮЗГУ; **П.Ф.Кравчук**, д-р философ.наук, профессор, ЮЗГУ; **А.П.Кузьменко**, д-р физ.-мат.наук, профессор, ЮЗГУ; **Ю.Н.Кульчин**, чл.-корр.РАН, д-р физ-мат.наук,профессор, ИАиПУ РАН, Владивосток; **Ю.Д.Маркович**, д-р хим.наук, профессор, ЮЗГУ; **Д.А.Новиков**, чл.-корр.РАН, д-р техн.наук, профессор, ИПУ РАН, Москва; **А.В.Олейник**, д-р техн.наук, профессор, департамент Минтранс РФ, Москва; **В.Н.Опарин**, чл.корр.РАН, д-р физ-мат.наук, пофессор, ИГД РАН, Новосибирск; **А.В.Островский**, д-р экон.наук, профессор ИДВ РАН, Москва; **В.И.Римшин**, д-р техн.наук, профессор, МГАКХ, Москва; **Г.В.Секесов**, д-р техн.наук, профессор, ИГД РАН, Хабаровск; **В.Н.Сусликов**, д-р юр.наук, профессор, ЮЗГУ; **М.Л.Титаренко**, ак.РАН, д-р философ.наук, профессор, ИДВ РАН, Москва; **В.С.Титов**, д-р техн.наук, профессор, ЮЗГУ; (отв.секретарь); **В.С. Федоров**, д-р техн.наук, профессор, чл. кор РААСН, Московский гос. ун-т путей сообщения; **А.С.Ястребов**, д-р техн.наук, профессор, СПГУТ, Санкт-Петербург; **С.Ф.Яцун**, д-р техн.наук, профессор, ЮЗГУ.

СОДЕРЖАНИЕ

Уважаемые коллеги! 6

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА 7

Жусубалиев Ж.Т.
О многослойной замкнутой инвариантной кривой в необратимых отображениях *7*

Чернецкая И.Е.
Исследование электропривода, включающего барабанный окомкователь как объект управления *15*

Виноградова Л.Н., Бажинов А.Н., Ершов Е.В.
Метод прогнозирования качества агломерата на основе нейронных сетей и нечетких множеств *21*

Певзнер А.А.
Синтез САР с заданными динамическими характеристиками методом функций сопрягающих частот ... *29*

Егоров С.И.
Пошаговое декодирование выколотых кодов Рида-Соломона *34*

Волобуев С.В., Зотов И.В.
Организация барьерной синхронизации в стандарте mpi с использованием распределенного многослойного параллельно-конвейерного синхронизатора *41*

Векленко Ю.А., Зотов И.В.
Архитектура стендово-имитационной среды отработки перспективных авиационных систем управления оружием ... *45*

Бехтин Ю.С.
Комплексирование зашумленных мультиспектральных изображений поиском когерентных структур на основе вейвлет-преобразования *53*

МЕДИЦИНСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ 60

Попечителев Е.П., Даровских С.Н.
Информационная физиотерапия и аппаратные средства её реализации *60*

Редакционная коллегия:

Главный редактор
С.Г. Емельянов, д-р техн.наук, профессор

Зам. главного редактора
В.С. Титов, д-р техн.наук, профессор

Члены редколлегии:

Зотов И.В., д-р техн. наук, профессор
Дрейзин В.Э. д-р техн. наук, профессор
Кореневский Н.А., д-р техн.наук, профессор
Ширабакина Т.А., канд. техн. наук, профессор

Адрес редакции: 305040, г. Курск, ул.50 лет Октября, 94.
Телефоны: (4712) 50-48-19
Факс: (4712) 50-48-00. E-mail: rio_kursk@mail.ru

Оригинал-макет подготовлен Е.В. Мельник

Подписано в печать 10.05.11. Формат 60x84/8.
Бумага офсетная. Усл.печ.л. 9,4.
Тираж 1000 экз. Заказ 56. Цена свободная.
Юго-Западный государственный университет
305040, г. Курск, ул.50 лет Октября, 94.

Плата с аспирантов за публикацию не взимается.

Томакова Р.А., Филист С.А., Шульга Л.В.
Информационные технологии для исследования эритроцитометрических показателей крови на основе дескрипторов Фурье *67*

Попечителев Е.П., Филист С.А.
Способы и модели идентификации биоматериалов на основе анализа многочастотного импеданса *74*

К сведению авторов 81

© Юго-Западный государственный университет, 2011

№1 2011

Scientific technical journal

Published twice a year

PROCEEDINGS

of the SOUTH-WEST
STATE
UNIVERSITY
Management, computer facilities,
Computer science. Medical instrument making

CONTENS

Respected Colleques! 6

INFORMATICS, COMPUTER SCIENCES 7

Zhusubaliyev Z.T.
On a Multilayered Closed Invariant Curve in
Non-Invertible Maps 7

Chernetskaya I. E.
Research of the Electric Drive Including Drum-Type
Pelletezer as Object of Control 15

Vinogradova L.N., Bazhinov A.N., Ershov E.V., Pevzner A.A.
Synthesis Cap with the Set Dynamic Characteristics
a Method of Functions of Interfacing Frequencies 21

Pevzner A.A.
Synthesis Cap with the Set Dynamic Characteristics
a Method of Functions of Interfacing Frequencies 29

Egorov S.I.
On-the-Fly Decoding for Punctured Reed-Solomon Codes 34

Volobuev S.V., Zotov I.V.
The Organization of Mpi-Targeted Barrier Synchronization
Using a Distributed Multislice Parallel-Pipelined Synchronizer 41

Veklenko Yu.A., Zotov I.V.
A Simulation Testbed Environment Framework for the Verification
of Future-Technology Airborne Weapon Control Systems 45

Bekhtin Y.S.
Wavelet-Based Fusion of Noisy Multispectral Images
Using Matching Pursuit of Coherent Structures 53

MEDICAL INSTRUMENT MAKING 60

Popechitelev E.P., Darovskikh S.N.
Information Physiotherapy and Hardware of Its Realization 66

Tomakova R.A., Filist S.A., Shulga L.V.
Information Technologies for Studying Erythrometric Indices of Blood on the Basis of Fourier Descriptors 67

Popechitelev E.P., Filist S.A.
Ways and Models of Identification of Biomaterials on the Basis of the Analysis of the Multifrequency Impedance 74

Information for authors 81

© South-West State University, 2011

Уважаемые коллеги!

Предлагаемый читателям журнал объединяет статьи, посвященные управлению, вычислительной технике, информатике и медицинскому приборостроению.

В условиях ускоренного развития указанных направлений в мире и в нашей стране, а также растущего спроса на такие продукты со стороны промышленности, представленные материалы сборника отражают развитие исследований и получение новых результатов в области теории управления, информатики и медицинского приборостроения авторами, которые являются ведущими специалистами в своих предметных областях.

Материалы сборника тематически подразделяются на разделы:

1. Управление в технических системах.
2. Средства вычислительной техники.
3. Искусственный интеллект.
4. Медицинское приборостроение.

Раздел 1 посвящен проблемам управления в горнорудной и авиационной промышленности, синтезу систем автоматического управления.

В разделе 2 рассмотрен круг проблем по средствам вычислительной техники, а именно по декодированию выколотых кодов Рида-Соломона, организации барьерной синхронизации с использованием распределенного многослойного параллельно-конвейерного синхронизатора.

Раздел 3 посвящен комплексированию зашумленных мульти-спектральных изображений на основе Вейвлет-преобразований.

Статьи раздела 4 посвящены применению информационных технологий в медицине и биологии.

Таким образом, сборник отражает достаточно широкий спектр научных результатов, полученных в области управления, вычислительной техники, информатики и медицинского приборостроения. Авторы статей продолжают развивать существующие и выдвигать новые подходы к решению задач в своих предметных областях. Опубликованные работы носят и фундаментальный, и прикладной характер, имеют высокий научный уровень и дают представление о ряде важных и актуальных исследований, существенных результатах, полученных за последнее время.

С.Г.Емельянов, д-р техн.наук,
профессор, ректор ЮЗГУ,
главный редактор журнала

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА

УДК 517.938

Ж.Т. Жусубалиев, д-р. техн. наук, профессор, кафедра вычислительной техники, ЮЗГУ
(e-mail: zhanybai@gmail.com)

О МНОГОСЛОЙНОЙ ЗАМКНУТОЙ ИНВАРИАНТНОЙ КРИВОЙ В НЕОБРАТИМЫХ ОТОБРАЖЕНИЯХ

В статье обсуждается новый феномен в двумерных эндоморфизмах, демонстрирующих переход к хаосу через разрушение замкнутой инвариантной кривой. Как известно, при рациональном числе вращения на этой кривой имеется четное число периодических орбит, половина из которых устойчивые, а половина – седловые, а сама кривая образована замыканием неустойчивых могообразий седловых циклов. Как оказалось, если отображение необратимо, то седловая периодическая орбита, лежащая на инвариантной кривой, обычно претерпевает бифуркацию удвоения периода или бифуркацию вилки. В результате этого мягко рождаются два новых «слоя», образованные неустойчивыми многообразиями седлового цикла удвоенного периода или неустойчивыми многообразиями двух седловых циклов того же периода в случае бифуркации вилки.

Ключевые слова: *бифуркации, квазипериодическая динамика, хаос, необратимые отображения, замкнутая инвариантная кривая.*

***

1. Введение

Возникновение хаотических колебаний через разрушение двумерного тора, на котором число вращения рационально, – широко распространенное явление. В.С. Афраймович и Л.П. Шильников доказали теорему о разрушении замкнутой инвариантной кривой в сечении тора с резонансной структурой и указали возможные пути хаотизации колебаний [1,2]. Общий характер выводов этой теоремы был подтвержден численно и экспериментально для широкого класса дискретных и потоковых систем.

В последние годы теория Афраймовича-Шильникова была существенно дополнена некоторыми модификациями, характерными для необратимых отображений (эндоморфизмов) и кусочно-гладких динамических систем [3–6]. Как было установлено авторами работ [3,4], разрушение замкнутой кривой может быть связано с особой нелокальной бифуркацией, приводящей к бесконечному числу самопересечений неустойчивых многообразий седловой периодической орбиты с образованием «петель» на инвариантной кривой [7], сгущающихся к точкам устойчивого резонансного цикла [3,4].

В недавней нашей работе [8] при анализе динамики трехмерной системы кусочно-гладких дифференциальных уравнений впервые был обнаружен резонансный тор с «двухслойной структурой». Такой тор является объединением неустойчивый многообразий двух седловых периодических орбит с устойчивым циклом. В последующих исследованиях [9–12] было показано, что это явление – универсальное свойство двумерных эндоморфизмов [13–15], причем число «слоев» резонансного тора может быть и больше двух. Такой тор мы назвали «многослойным».

В данной статье преследуется цель описать это явление на простейшем примере необратимого отображения. Важно отметить, что многие системы в теории автоматического управления и электронике приводят к моделям в виде необратимых отображений. Это, например, системы с импульсной модуляцией [6] и адаптивным управлением [14]. При моделировании в экономике [16] и биологии

[17], нейронный сетей [18] также возникают необратимые отображения.

2. Рождение и разрушение многослойной замкнутой кривой

Рассмотрим двумерное необратимое отображение [6,7]

$$F:\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \to \begin{pmatrix} y \\ by - cx + x^2 \end{pmatrix}, \qquad (1)$$

принадлежащее к классу $(Z_0 - Z_2)$.

Фазовая плоскость отображения (1) делится на две открытые области Z_0 и Z_2, такие, что точка $X = (x, y)^T$, принадлежащая Z_2, имеет два разных прообраза $F^{-1}(X)$ ранга один, а точка $X = (x, y)^T$ из области Z_0 – ни одного. Границей указанных областей является линия LC (от слова «ligne critique») [6,7], которая есть геометрическое место точек X, имеющих два совпадающих прообраза $F^{-1}(X)$, расположенных на так называемой *кривой сливающихся прообразов* («*curve of merging pre-images*») LC_{-1} [6,7]. Если отображение непрерывно и непрерывно дифференцируемо, то LC_{-1} включена во множество, определяемое условием

$$|J(X)| = 0,$$

где $|J(X)|$ – определитель матрицы Якоби. Для рассматриваемого отображения определитель матрицы Якоби обращается в нуль вдоль вертикальной прямой

$$LC_{-1} = \{(x, y) : x = c/2\}.$$

Если отображение недифференцируемо, как в случае кусочно-гладких систем, то роль LC_{-1} обычно играет кривая недифференцируемости, на которой определитель матрицы Якоби меняет знак. Кривую LC, удовлетворяющую $F(LC_{-1}) = LC$ и $F^{-1}(LC) \supseteq LC_{-1}$, называют критической линией ранга один. Для отображения (1) уравнение критической линии LC имеет вид

$$LC = F(LC_{-1}) = \{(x, y) : y = bx - c^2/4\}.$$

Образ ранга k кривой LC называется критической линией ранга k+1: $LC_k = F^k(LC)$. Следует отметить, что отображения типа $(Z_0 - Z_2)$ составляют класс необратимых отображений, обладающих простейшими свойствами. Принимая во внимание сложность предмета исследования, мы не будем обсуждать вопрос о роли критических линий при бифуркациях инвариантных торов. Заинтересованных читателей отсылаем к специальным источникам [13–15].

Отображение (1) имеет две неподвижные точки $O_1 = (0,0)^T$ и $O_2 = (1-b+c, 1-b+c)^T$. На линии $N_\varphi = \{(b, c) : c = 1\}$ плоскости параметров (b, c) неподвижная точка $O_1 = (0, 0)^T$ теряет устойчивость, когда комплексно-сопряженная пара мультипликаторов выходит на границу единичного круга. При этом из неподвижной точки рождается замкнутая инвариантная кривая через суперкритическую бифуркацию Неймарка-Саккера. На рис. 1 приведена карта динамических режимов, рассчитанная в плоскости параметров (b, c). Области периодичности, расположенные выше бифуркационной границы N_φ, соответствуют резонансным языкам (иногда их называют языками Арнольда). На рис. 1 выделен резонансный язык 1:5.

В классическом случае внутри каждого клюва на замкнутой инвариантной кривой существуют пара циклов – устойчивый и неустойчивый, отвечающие рациональному значению числа вращения, а сам тор является объединением неус-

тойчивых многообразий седловой периодической орбиты с устойчивым циклом.

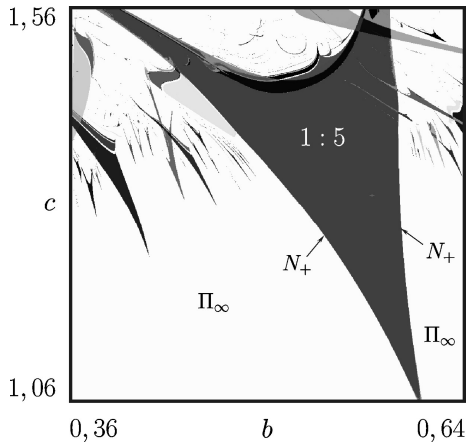


Рис. 1. Карта динамических режимов в плоскости параметров (b,c)

Острие языка с числом вращения $p:q$, где p, q – целые числа, опирается на кривую N_φ в точке коразмерности два. Поскольку такие рациональные точки всюду плотны на N_φ, то и клювы расположены всюду плотно. Это означает, что между любыми квазипериодическими режимами с различными числами вращения существует область резонанса (см. рис. 1). Резонансные клювы ограничены линиями седло-узловой бифуркации N_+, где устойчивый и неустойчивые циклы сливаются и исчезают. На рис. 2 приведена бифуркационная диаграмма, иллюстрирующая основные стадии рождения трехслойного тора (сечение А на рис. 1). В точке $\acute{n} = \acute{n}_\varphi$, лежащей на линии N_φ, из неподвижной O_1 рождается замкнутая инвариантная кривая Т с иррациональным числом вращения. На рис. 3 приведен фазовый портрет отображения, отвечающий квазипериодическому режиму. На рис. 1 область квазипериодической динамики обозначена через Π_∞. Как мы уже отмечали, переход к резонансному тору осуществляется через бифуркацию седло-узел на линии N_+.

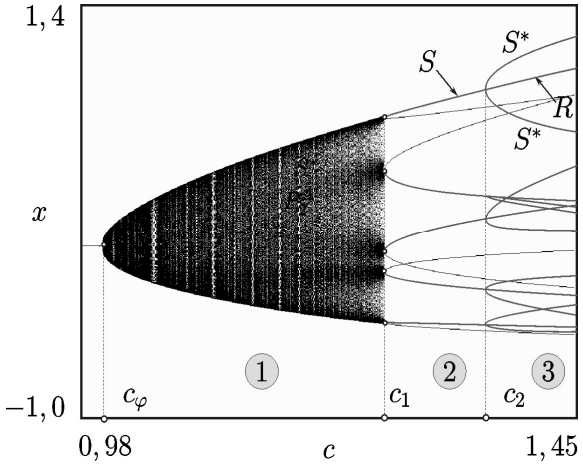


Рис. 2. Бифуркационная диаграмма, иллюстрирующая рождение замкнутой инвариантной кривой с трехслойной структурой (b=0,54)

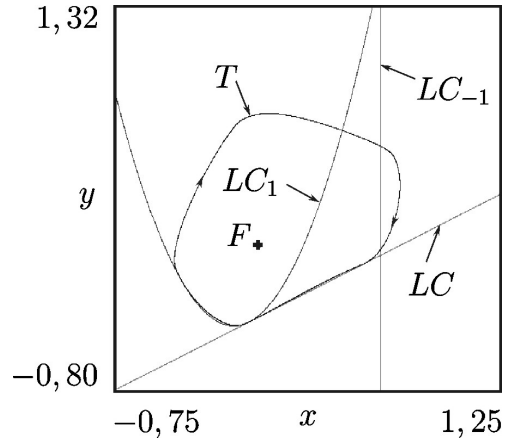


Рис. 3. Замкнутая кривая Т с иррациональным числом вращения, отвечающая квазипериодическому режиму (a=1,32;b=0,54). F –неустойчивый фокус; LC_{-1} – кривая сливающихся прообразов; LC и LC_1 – критические линии ранга один и ранга два, соответственно

На рис. 4 изображен фазовый портрет динамической системы после седло-узловой бифуркации, при которой возникает «однослойная» замкнутая кривая. При дальнейшем увеличении параметра с, резонансный цикл переходит из устойчивого узла N в устойчивый фокус F_0, когда мультипликаторы становятся комплексно-сопряженными. При этом инвариантный тор теряет гладкость вблизи точек устойчивого цикла.

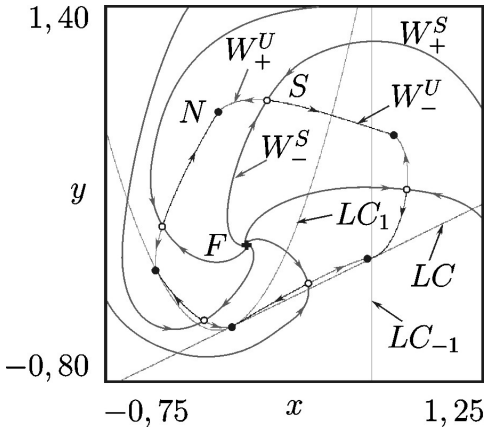


Рис. 4. «Однослойная» замкнутая кривая (a=1,32; b=0,54). N, S – соответственно устойчивый и седловой резонансные циклы. $W_{\pm}^S$, $W_{\pm}^U$ – устойчивые и неустойчивые многообразия седловой периодической орбиты S

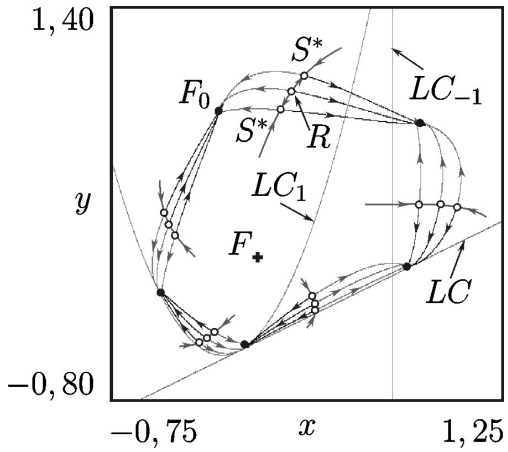


Рис. 5. Трехслойная инвариантная кривая (a=1,375; b=0,54). F_0 – устойчивый резонансный цикл; R – неустойчивый узловой 5-цикл (репеллер); S* – седловой 10-цикл, возникающий через бифуркацию удвоения периода

Затем, в точке $c = c_2$, как это видно на рис. 2, мягко возникает неустойчивый 10-цикл S^* через бифуркацию удвоения периода, а седловой 5-цикл S становится неустойчивым узлом R (репеллером). В результате такого перехода из однослойной замкнутой инвариантной кривой (рис. 4) мягко рождается трехслойная (рис. 5). Внешние два слоя являются притягивающими и образованы неустойчивыми многообразиями седлового 10-цикла S^*, а внутренний слой – неведущими многообразиями неустойчивого узла R.

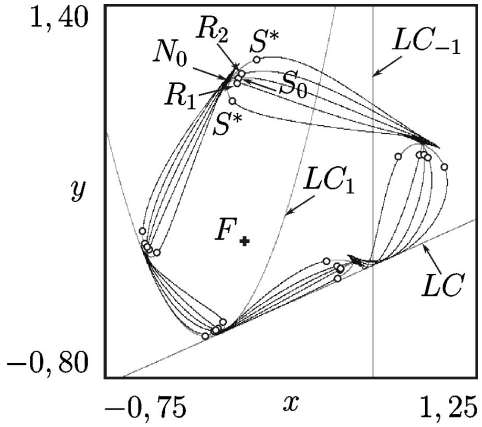


Рис. 6. Пятислойная инвариантная кривая (a=1,379; b=0,4905): S_0 – седловой цикл периода 5; N_0 – устойчивый резонансный цикл; R_1, R_2 – неустойчивые циклы периода 5 (репеллеры), возникающие через бифуркацию вилки неустойчивого узла R (см. рис. 5)

При изменении параметров трехслойная замкнутая кривая может перейти в пятислойную следующим образом (рис. 6). При движении по параметрам к границе N_+ резонансного языка неустойчивый узел R претерпевает бифуркацию вилки, в результате которой возникают два симметричных неустойчивых циклов узлового типа R_1 и R_2, а неустойчивый узел R становится седлом S_0. При этом центральный слой вновь становится притягивающим, но возникают два новых «отталкивающих» слоя.

При дальнейшем изменении параметров наблюдается сложная последовательность бифуркаций, приводящая к разрушению инвариантной кривой и возникновению хаотических колебаний. Мы не будем детально обсуждать механизмы разрушения многослойной замкнутой инвариантной кривой, а ограничимся рассмотрением лишь двух сценариев, связанных с бифуркацией седло-узел и гомоклинической бифуркацией.

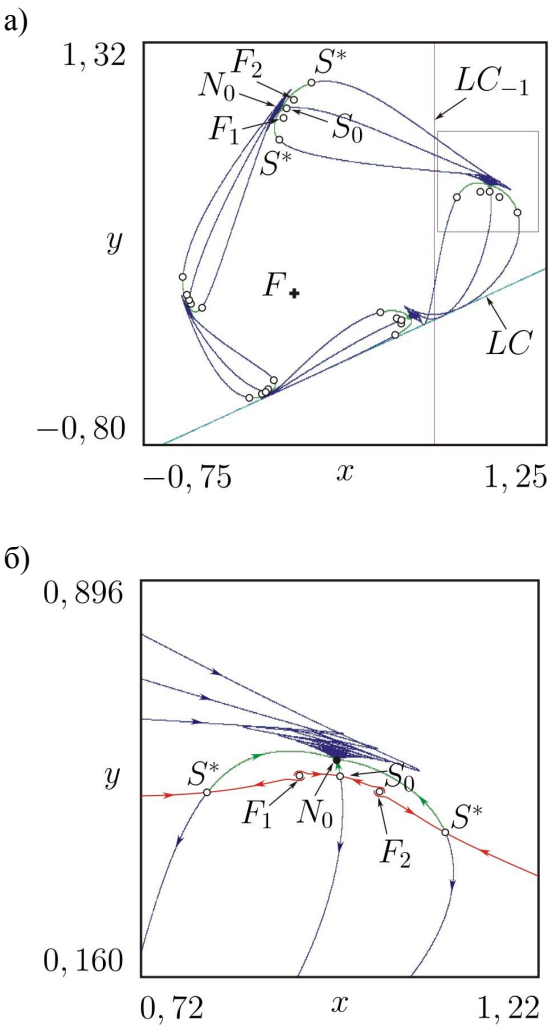


Рис. 7. Переход от пятислойной к трехслойной инвариантной кривой. Средние два слоя (рис. 6) исчезают, когда неустойчивые узлы R_1 и R_2 становятся неустойчивыми фокусами F_1, F_2

Рис. 7 и рис.8 иллюстрируют случай, связанный с седло-узловой бифуркацией. Этот переход наблюдается при выходе из резонансного языка через левую границу N_+. В этом случае сначала пятислойная замкнутая кривая (рис. 6 переходит в трехслойную, когда неустойчивые узлы R_1 и R_2, лежащие на центральном слое, становятся неустойчивыми фокусами F_1, F_2. Эта бифуркация проиллюстрирована на рис. 7. Затем седловой цикл S_0, лежащий на центральном слое, «подтягивается» к устойчивому узловому 5-циклу N_0, сливается с ним и исчезает на линии N_+. В результате этого центральный слой трехслойной замкнутой кривой исчезает, а неустойчивые многообразия внешних слоев формируют «хаотическое множество», причем, связанные с ними седловая орбита S^* и неустойчивые фокусы F_1, F_2 продолжают существовать (см. рис. 8).

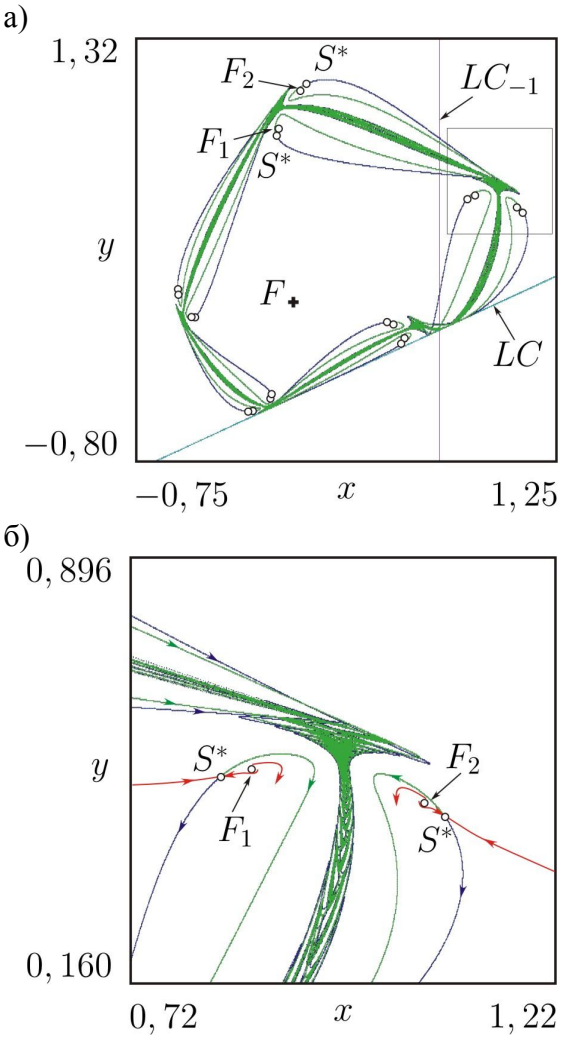
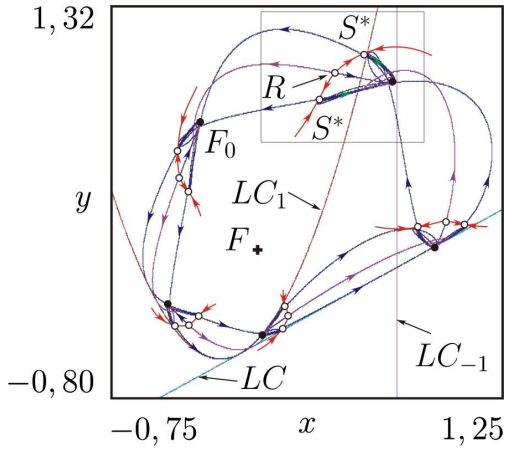


Рис. 8. Фазовый портрет отображения (1) после седло-узловой бифуркации

При изменении параметров в направлении правой границы резонансного языка, пятислойная инвариантная кривая сначала переходит в трехслойную через бифуркацию вилки, а затем реализуются две гомоклинические бифуркации, в результате которых сначала разрушается внешний слой, а затем внутренний.

а)



б)

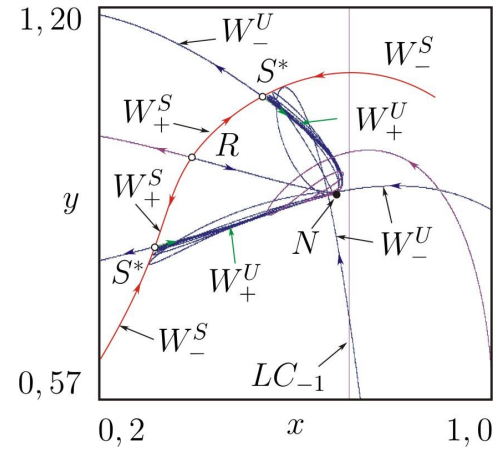
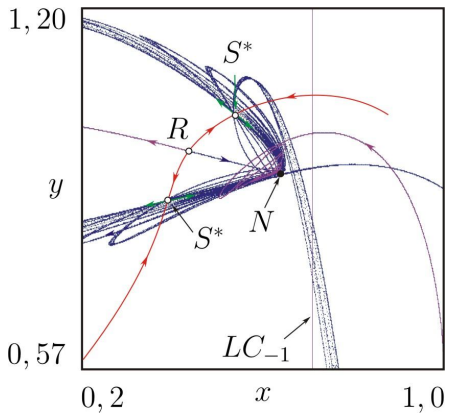


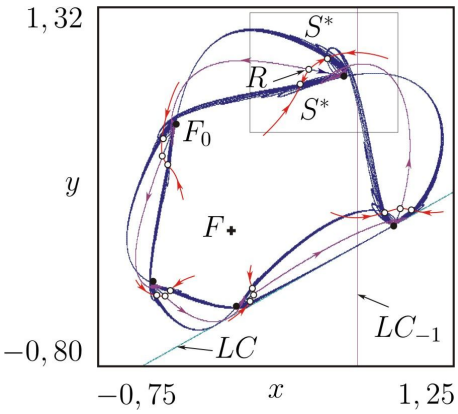
Рис. 9. Разрушение внешнего слоя через гомоклиническую бифуркацию. *а* – фазовый портрет отображения вблизи гомоклинического касания. *б* – увеличенный фрагмент фазового портрета, выделенного прямоугольником

На рис. 9 изображен момент гомоклинического касания устойчивого и неустойчивого многообразий седловой периодической орбиты S^*. Дальнейшие изменения параметров приводят к рождению гомоклинических точек трансверсального пересечения многообразий (рис. 10, *а* и рис. 10, *б*). Как можно видеть из рис. 10 и рис. 11, *а*, после этой бифуркации внешний слой превращается в довольно сложное множество с фрактальной структурой, однако центральный слой продолжает существовать. На рис. 10, *в* показан отдельно увеличенный фрагмент центрального слоя после гомоклинической бифуркации. Затем седловой 10-цикл S^* претерпевает «обратную» бифуркацию удвоения периода, что приводит к исчезновению внешнего слоя.

а)



б)



в)

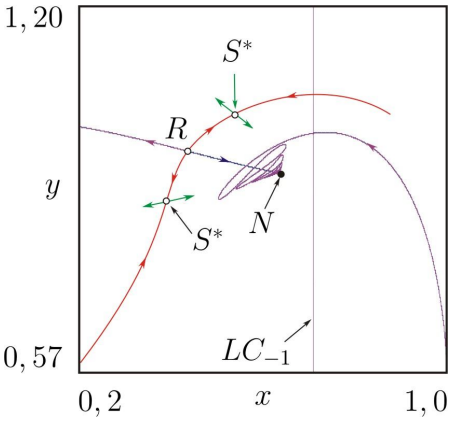


Рис. 10. *а* – фазовый портрет после разрушения внешнего слоя; *б* – увеличенный фрагмент фазового портрета, изображенного на рис. 10, *а*; *в* – центральный слой после гомоклинической бифуркации

На рис. 11, *а* изображен фазовый портрет перед бифуркацией удвоения периода. Рис. 11, *б* иллюстрирует фазовый

портрет после «обратной» бифуркации удвоения периода. На рис. 11, *в* приведен увеличенный фрагмент однослойной замкнутой кривой.

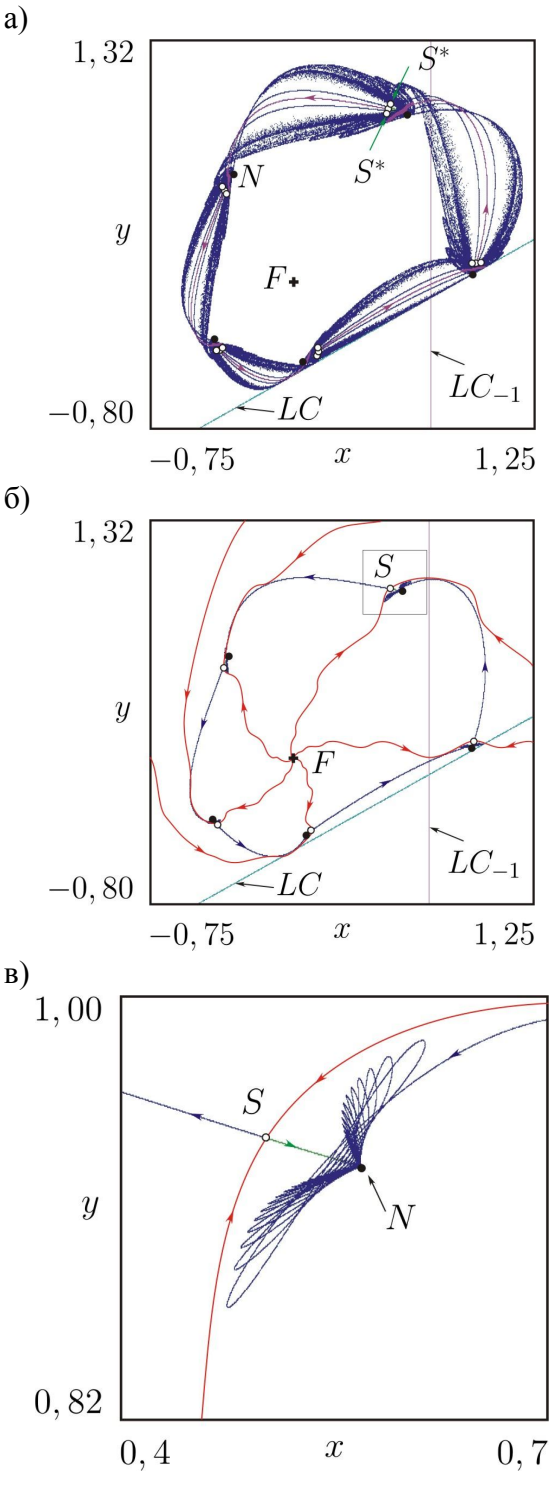


Рис. 11. *а* – фазовый портрет перед «обратной» бифуркацией удвоения периода; *б* – фазовый портрет после бифуркации удвоения периода седлового 10-цикла; *в* – увеличенный фрагмент однослойной замкнутой кривой

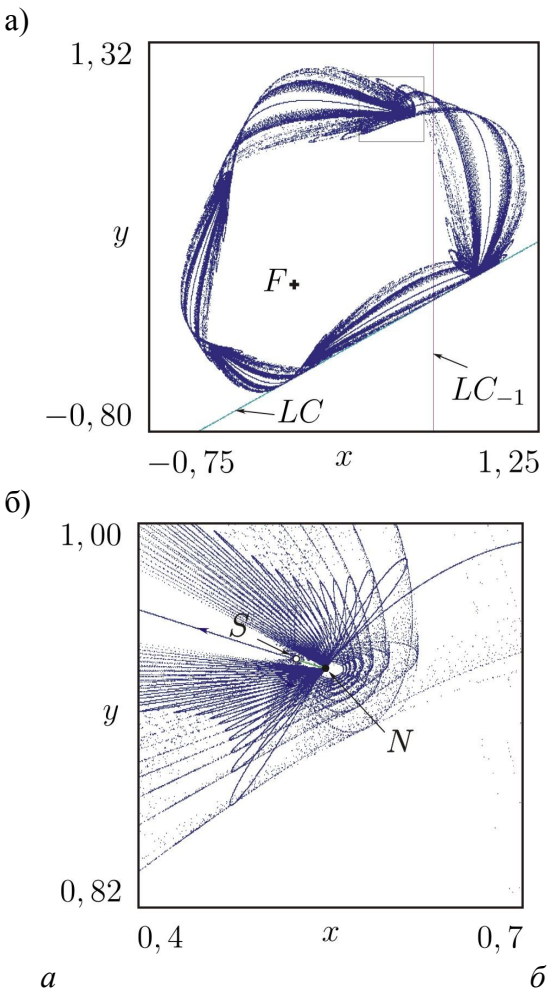


Рис. 12. Разрушение однослойной замкнутой кривой через гомоклиническую бифуркацию

Далее реализуется вторая гомоклиническая бифуркация, приводящая к разрушению однослойной инвариантной кривой. После бифуркации седло-узел на границе N_+ резонансного языка движение становится хаотическим. На рис. 12, *а* показан фазовый портрет после гомоклинической бифуркации, а на рис. 12, *б* – увеличенный фрагмент фазового портрета.

3. Заключение

Представленная статья посвящена обсуждению бифуркаций замкнутой инвариантной кривой с многослойной структурой в двумерных эндоморфизмах. В качестве конкретного примера приведены результаты бифуркационного анализа квадратичного необратимого отображения. В плоскости параметров выде-

лены области с различным динамическим поведением. Показано, что при изменении параметров в пределах резонансного языка, седловая периодическая орбита, лежащая на замкнутой инвариантной кривой, претерпевает бифуркацию удвоения периода, становясь неустойчивым узлом (репеллером). В результате такой бифуркации на этой кривой мягко рождаются два новых «слоя», образованные неустойчивыми многообразиями седлового цикла удвоенного периода. Неустойчивый узловой цикл (репеллер), лежащий на центральном слое, может претерпевать бифуркацию вилки, при которой возникает «пятислойная» замкнутая кривая. При изменении параметров инвариантная кривая разрушается, и при выходе из резонансного языка через линию седло-узловой бифуркации движение становится хаотическим. Детальное обсуждение механизмов разрушения многослойной замкнутой инвариантной кривой требует отдельной статьи. Поэтому, мы ограничились анализом лишь двух сценариев, связанных с гомоклинической бифуркацией.

Список литературы

1. Афраймович В.С., Шильников Л.П. Инвариантные двумерные торы, их разрушение и стохастичность // Методы качественной теории дифференциальных уравнений. Горький: Изд-во Горьк. ун-та, 1983. С. 3-36.

2. Теория бифуркаций / В.И. Арнольд, В.С. Афраймович, Ю.С. Ильяшенко, Л.П. Шильников // Современные проблемы математики: фундаментальные направления / под ред. В.И. Арнольда. М.: ВИНИТИ, 1986**.** Т. 5. С. 5-218.

3. Maistrenko V., Maistrenko Yu., Mosekilde E. Torus breakdown in noninvertible maps // Phys. Rev. E 67. 2003. 046215-1– 046215-6.

4. Frouzakis C.E., Kevrekidis I.G., Peckhman B.B. A route to computational chaos revisited: noninvertibility and breakup of an invariant circle // Physica D. 177. 2003. Pp. 101–121.

5. Zhusubaliyev Zh.T., Mosekilde E. Bifurcations and Chaos in Piecewise-Smooth Dynamical Systems. World Scientific. Singapore. 2003. 376 p.

6. Zhusubaliyev Zh.T., Mosekilde E., De S., Banerjee S. Transition from phase-locked dynamics to chaos in a piecewise-linear map // Phys. Rev. E. 77. 2008 Pp. 026206-1–026206-9.

7. Lorenz E.N. Computational chaos – a prelude to computational instability // Physica D. 35. 1989. Pp. 299–317.

8. Zhusubaliyev Zh.T., Mosekilde E. Birth of bilayered torus and torus breakdown in a piecewise-smooth dynamical system // Phys. Lett. A 351 (2006) 167–174.

9. Zhusubaliyev Zh.T., Mosekilde E. Formation and destruction of multilayered tori // Chaos. 18. 2008. Pp. 037124-1–037124-12.

10. Zhusubaliyev Zh.T., Mosekilde E. Multilayered tori in a system of two coupled logistic maps // Phys. Lett. A. 373 (2009) 1021–1027.

11. Zhusubaliyev Zh.T., Mosekilde E. Novel routes to chaos through torus breakdown in noninvertible maps // Physica D. 2009 238 Pp. 502 –516.

12. Жусубалиев Ж.Т., Яночкина О.О. Рождение и разрушение многослойной замкнутой кривой в необратимых отображениях// Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 18(1). 2010. С. 53–62.

13. Mira C., Gardini L., Barugols A., Cathala J.C. Chaotic Dynamics in Two-Dimensional Noninvertible Maps. World Scientific, Singapore, 1996. 632 p.

14. Frouzakis C.E., Gardini L., Kevrekidis I.G., Millerioux G., Mira C. On some properties of invariant sets of two-

dimensional noninvertible maps // Int. J. Bifurcat. Chaos. 7. 1997. Pp. 1167–1194.

15. England J. P., Krauskof B., Osinga H.M. Bifurcations of stable sets in noninvertible planar maps // Int. J. Bifurcat. Chaos. 15. 2005. Pp. 891–904.

16. Dieci R., Bischi G.I., Gardini L. Multistability and role of noninvertibility in a discrete-time business cycle model // Central European Journal of Operation Research. Vol. 9. 2001 Pp. 71-96.

17. Mosekilde E., Maistrenko Yu., Postnov D. Chaotic Synchronization: Applications to Living Systems. World Scientific. Singapore. 2002. 440 p.

18. Rico-Martinez R., Adomaitis R.A., Kevrekidis I.G. Noninvertibility in neural networks // Computers and Chemical Engineering. 24. 2000. Pp. 2417–2433.

Получено 08.02.11

Z. T. Zhusubaliyev, Doctor of Sciences, Professor, Professor, Computer Science Chair, SWSU
(e-mail: zhanybai@gmail.com)

ON A MULTILAYERED CLOSED INVARIANT CURVE IN NON-INVERTIBLE MAPS

The paper describes the mechanism for the formation of closed invariant curves that are formed as layered structures of several sets of interlacing manifolds each with their associated stable or unstable resonance modes. Such invariant curves can arise, for instance, if the saddle cycle on a «simple resonance curves» undergoes period-doubling or pitchfork bifurcations transversely to the circumference of the closed curve.

Keywords: *bifurcations, quasiperiodic dynamics, chaos, non-invertible maps, closed invariant curve.*

УДК 622.673.8

И.Е. Чернецкая, канд. техн. наук, доцент, кафедра вычислительной техники, ЮЗГУ
(e-mail: white731@yandex.ru)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА, ВКЛЮЧАЮЩЕГО БАРАБАННЫЙ ОКОМКОВАТЕЛЬ КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрен гипотетический электропривод, использующий в качестве объекта управления барабанный окомкователь. Проанализированы моменты, действующие в системе, и их влияние на качество процесса. Установлено, что значительное влияние на работу системы оказывает масса материала, находящегося в барабанном окомкователе.

Ключевые слова: *окомкование, сыпучий тонкоизмельченный материал, барабанный окомкователь*

***

Процесс окомкования сыпучих тонкоизмельченных (дисперсных) материалов осуществляется в чашевых, или барабанных окомкователях и характеризуется значительным количеством взаимно связанных факторов, наиболее важными из которых являются характеристики сырья и работа механического оборудования, а именно скорость вращения и производительность окомкователя, а также его угол наклона [1] .

Рассмотрим гипотетический электропривод с параметрами, близкими к параметрам электроприводов большинства фабрик окомкования.

С учетом изложенного проведем определенный математический анализ для рассмотренной системы (рис.1). Представленная система является трехмассовой, однако для исследования отдельных особенностей ее работы, сведем эту систему к двухмассовой, исключив упругую связь $C_{11,}$ так как основную долю момента инерции составляют моменты инерции двигателя J_1 и вращающегося барабана J_2.

Характерной особенностью машин и механизмов, подобных приведенной на рис.1, является наличие упругих механических звеньев в кинематических линиях. Упругие механические звенья в пере-

ходных режимах способствуют возникновению колебаний, в результате чего возникают дополнительные динамические нагрузки привода, и процессы в действительности не соответствуют оптимальным. Общий момент инерции барабана: $J_2 = J_б + J_{сод}$. Здесь $J_б$ – момент инерции пустого барабана, $J_{сод}$ – момент инерции содержимого барабана.

Момент инерции пустого барабана:

$$J_б = \int_0^{\delta} \rho_б L \pi \left(\frac{D}{2} - \delta + r\right)^3 dr = \frac{\pi \rho_б L}{4}\left(\frac{D}{2} - \delta + r\right)^4 \Bigg|_0^{\delta} = \frac{\pi \rho_б L}{4}\left[\left(\frac{D}{2}\right)^4 - \left(\frac{D}{2} - \delta\right)^4\right], \qquad (1)$$

где $\rho_á$ – плотность материала барабана; L – длина барабана; D – диаметр барабана; δ – толщина стенки барабана с гарнисажем; r – толщина стенки барабана.

Расчет момента инерции содержимого $J_{ñîä}$ производим с использованием ЭВМ, предварительно выбрав примерные профили заполнения барабана. Для нашего случая примем следущий закон заполнения, достаточно близко отражающий профиль перемещающегося материала в окомкователе

$$\rho(\varphi, l) = \left(\frac{D}{2} - \delta\right)\left[1 - \frac{\mathrm{Sin}\left(\varphi l - \pi \dfrac{l-1}{2+\dfrac{1}{l}}\right)}{\varphi + \dfrac{l^2}{4}}\right], \qquad (2)$$

где φ – угол подъема материала; ρ – степень заполнения барабана материалом; l – длина элементарного участка шихты в барабане.

Этому выражению соответствует распределение материала в окомкователе (рис. 2).

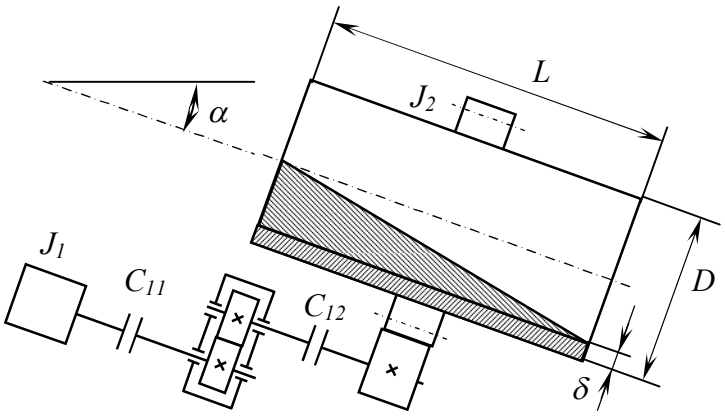


Рис.1. Схема электропривода для окомкования сыпучих материалов

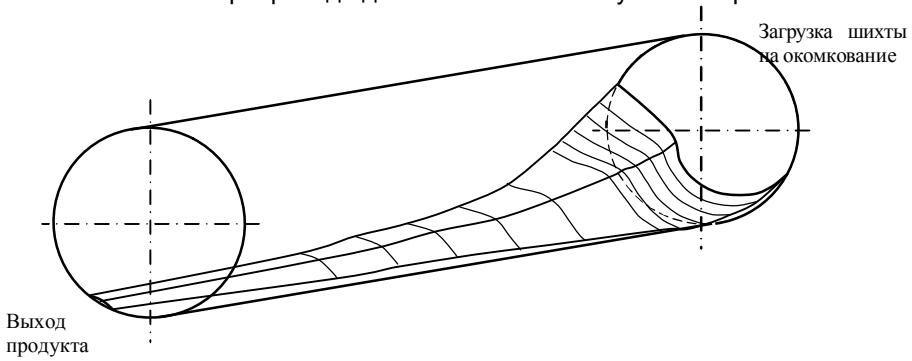


Рис.2. Схема распределения материала в окомкователе

Расчет момента инерции содержимого:

$$J_{\text{ńîä}} = \iiint_D \rho^2 dm .$$

При этом $dm=\gamma\cdot dv$, $dv=\rho\cdot dl\cdot d\rho\cdot d\varphi$.
Получим

$$J_{\text{ńîä}} = \iiint_D \gamma\cdot\rho^3 dl\cdot d\rho\cdot d\varphi ,$$

где γ – удельный вес шихты.

Раскрывая приведенный интеграл, получим

$$J_{\text{ńîä}} = \gamma \int_1^{L+1} dl \int_{\pi\frac{l^2+l+1}{2l^2+1}}^{\pi\frac{l-1}{2l+1}} d\varphi \int_{\left(\frac{D}{2}-\delta\right)\left[1-\frac{\varphi l-\pi(l-1)}{\varphi+\frac{1}{4}}\right]}^{\frac{D}{2}-\delta} \rho^3\cdot d\rho . \quad (3)$$

Для дальнейших исследований найдем момент сопротивления вращению барабана:

$$M_{ń2} = \iiint_D \rho dG = \iiint_D \rho \mathrm{Sin}\left(\varphi - \pi/3\right) g dm ,$$

где $dm=\gamma\cdot dv$, а $dv=\rho\cdot dl\cdot d\rho\cdot d\varphi$.

$$M_{ń2} = g\iiint_D \gamma\cdot \mathrm{Sin}\left(\varphi-\pi/3\right)\cdot\rho^2 dl\cdot d\rho\cdot d\varphi .$$

Раскрывая приведенный интеграл, получим

$$M_{ń2} = g\gamma \int_1^{L+1} dl \int_{\pi\frac{l^2+l+1}{2l^2+1}}^{\pi\frac{l-1}{2l+1}} \mathrm{Sin}\left(\varphi-\pi/3\right) d\varphi \int_{\left(\frac{D}{2}-\delta\right)\left[1-\frac{\varphi l-\pi(l-1)}{\varphi+\frac{1}{4}}\right]}^{\frac{D}{2}-\delta} \rho^2\cdot d\rho . \quad (4)$$

В любой момент времени для двухмассовой системы справедливы уравнения [2]

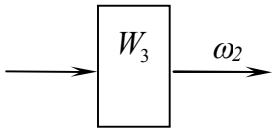
$$\begin{cases} M - M_{c1} - M_{12} = J_1 p\omega_1 \\ M_{12} - M_{C2} = J_2 p\omega_2 \\ pM_{12} = C_{12}(\omega_1 - \omega_2). \end{cases} \quad (5)$$

Здесь M – вращающий момент двигателя; M_{c1} – статический момент системы вал-шестерня редуктора; M_{12} – момент, прикладываемый к нагрузочной части привода; M_{c2} – момент нагрузки; C_{12} – упругая связь между элементами привода; J_1 и J_2 – моменты инерции первой и второй масс, соответственно; ω_1 и ω_2 – частоты вращения вала двигателя и барабана, соответственно; p – символ дифференцирования d/dt.

Система (5) может быть представлена структурной схемой [2] на рис.3.

Отметим, что в нашем случае M_{c2} – момент, создаваемый массой материала, находящегося в барабанном окомкователе.

Преобразование системы дифференциальных уравнений (5) путем исключения M_{12} и ω_1 относительно ω_2 осуществляем по методике [2] и получаем окончательно структурную схему:



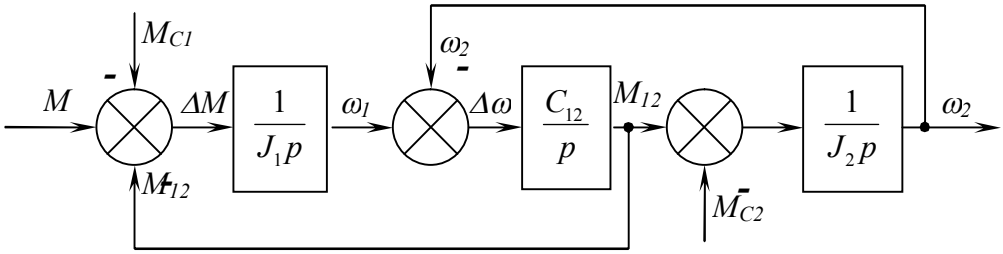


Рис.3. Структурная схема рассматриваемой электромеханической системы

В этом случае передаточная функция системы приобретает вид

$$W_3 = \frac{-M_{c2}J_1p^2 + J_1pC_{12} - M_{c2}C_{12}}{\left[J_1J_2p^3 - M_{c2}J_1p^2 + (J_2 + J_1)pC_{12} - M_{c2}C_{12}\right]J_1p}. \quad (6)$$

Тогда зависимость частоты вращения барабана от момента M выглядит следующим образом:

$$\omega_2 = M\frac{-M_{c2}J_1p^2 + J_1pC_{12} - M_{c2}C_{12}}{\left[J_1J_2p^3 - M_{c2}J_1p^2 + (J_2 + J_1)pC_{12} - M_{c2}C_{12}\right]J_1p}. \quad (7)$$

Предположив, что момент нагрузки на валу двигателя M_{c1} значительно меньше момента нагрузки барабана M_{c2}, получим

$$C_{12}\frac{Mp + C_{12}\omega_2}{J_1p^2 + C_{12}} - pM_{C2} = J_2p^2\omega_2 + C_{12}\omega_2. \quad (8)$$

Приведем это выражение к более удобному виду

$$C_{12}Mp + C_{12}^2\omega_2 - M_{C2}J_1p^3 - pM_{C2}C_{12} = \\ = J_2p^2\omega_2J_1p^2 + J_2p^2\omega_2C_{12} + \\ + C_{12}\omega_2J_1p^2 + C_{12}^2\omega_2.$$

Упростив его, получим

$$C_{12}\left(M - M_{C2}\right)p - M_{C2}J_1p^3 = \\ = \left[J_2J_1p^4 + \left(J_2 + J_1\right)C_{12}p^2\right]\omega_2. \quad (9)$$

Или в стандартном виде:

$$\frac{d\left[C_{12}\left(M - M_{C2}\right)\right]}{dt} - \frac{d^3\left(M_{C2}J_1\right)}{dt^3} = \\ = \frac{d^4\left(J_2J_1\omega_2\right)}{dt^4} + \frac{d^2\left[\left(J_2 + J_1\right)C_{12}\omega_2\right]}{dt^2}. \quad (10)$$

Рассмотрим переходный процесс согласно выражению (9)

$$\omega_2 = \frac{C_{12}\left(M - M_{C2}\right)p - M_{C2}J_1p^3}{\left[J_2J_1p^4 + \left(J_2 + J_1\right)C_{12}p^2\right]} = \\ = \frac{1}{J_2J_1}\cdot\frac{C_{12}\left(M - M_{C2}\right) - M_{C2}J_1p^2}{\left[p^2 + \frac{\left(J_2 + J_1\right)}{J_2J_1}C_{12}\right]p}. \quad (11)$$

Разложив (11) на рациональные дроби методом неопределенных коэффициентов и перейдя к оригиналам, получим выражение:

$$\omega_2 = \frac{1}{J_1J_2}\left[\frac{J_2J_1\left(M - M_{C2}\right)}{\left(J_2 + J_1\right)} - \right. \\ \left. - \frac{M_{C2}J_1^2 + J_2J_1M}{J_2 + J_1}\mathrm{Cos}\left(\sqrt{\frac{\left(J_2 + J_1\right)}{J_2J_1}C_{12}}\,t\right)\right]. \quad (12)$$

Анализируя (12), отметим колебательный характер частоты вращения барабана в функции соотношения моментов M и M_{c2}, и моментов инерции J_1 и J_2.

Дальнейшие исследования системы проведем с привлечением численных значений параметров гипотетического электропривода.

Определим передаточное число редуктора от вала двигателя к зубчатому колесу, на поверхности барабана.

$$i = \frac{n_{äâ}}{n_{áŕđŕáîň}} = \frac{1000}{8} = 125.$$

Принимаем передаточное число системы шестерня – барабан $i_{шб}$=5 и модуль зубьев m=0,03 м.

Число зубьев колеса на барабане

$$Z_2 = \frac{D}{m} = \frac{3}{0,03} = 100.$$

Тогда число зубьев шестерни найдем, исходя из условия сохранения передаточного числа.

$$Z_1 = \frac{Z_2}{i_{ř\,á}} = \frac{100}{5} = 20.$$

Диаметр шестерни:

$$d = m \cdot Z_1 = 0,03 \cdot 20 = 0,6 \text{ м}.$$

Передаточное число редуктора примем равным

$$i_p = \frac{i}{i_{ř\,á}} = \frac{125}{5} = 25.$$

Момент инерции пустого барабана согласно выражению (1):

$$J_{á} = \frac{\pi\rho_{á} L}{4}\left[\left(\frac{D}{2}\right)^4 - \left(\frac{D}{2}-\delta\right)^4\right] =$$

$$= \frac{3.1415\cdot 7,87\cdot 10^3\cdot 10}{4}\times$$

$$\times\left[\left(\frac{3}{2}\right)^4 - (1,5-0,03)^4\right] = 24291,63 \text{ кг·м}^2$$

Используя (2), (3) получим:

$J_{ńîä} = 19055$ кг·м^2.

Общий момент инерции после приведения к валу двигателя:

$$J_2 = \frac{J_2}{i^2} = \frac{43346}{125^2} = 2,7 \text{ кг·м}^2.$$

Момент инерции двигателя ПМ102 J_1=12 кг·м^2.

Жесткость муфты принимаем: $C_1 = 7,8\cdot 10^6$ Н·м и, так как, вторая муфта находится за редуктором, то ее жесткость приведем к валу двигателя:

$$C_{12} = \frac{C_1}{i_d{}^2} = \frac{7,8\cdot 10^6}{25^2} = 124742 \text{ Н·м}.$$

Определим частоты резонанса [2]. Резонансная частота системы

$$\Omega_{12} = \sqrt{\frac{C_{12}(J_1+J_2)}{J_1 J_2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{124742(12+2,7)}{12\cdot 2,7}} = 237,9.$$

Соотношение масс

$$\mu = \frac{J_1+J_2}{J_1} = \frac{12+2,7}{12} = 1,225.$$

Резонансная частота второй массы

$$\Omega_{22} = \frac{\Omega_{12}}{\sqrt{\mu}} = \frac{237,9}{\sqrt{1,225}} = 214,9.$$

Вычисляя (4), получаем: Mc2=43413 Н·м.

Момент, приведенный к валу двигателя

$$M_{c2} = \frac{M_{c2}}{i} = \frac{43413}{125} = 347,3 \text{ Н·м}$$

Рассмотрим вариант постоянной нагрузки (постоянная производительность барабанного окомкователя).

Тогда выражение (10) принимает вид:

$$\frac{d\left[C_{12}(M-M_{C2})\right]}{dt} = \frac{d^4(J_2J_1\omega_2)}{dt^4} + \frac{d^2\left[(J_2+J_1)C_{12}\omega_2\right]}{dt^2}. \quad (13)$$

Или

$$C_{12}(M-M_{C2}) = \frac{d^3(J_2J_1\omega_2)}{dt^3} + \frac{d\left[(J_2+J_1)C_{12}\omega_2\right]}{dt}.$$

В дальнейших расчетах будем использовать M*=M-M_{C2}, тогда

$$C_{12}M^* = \frac{d^3(J_2J_1\omega_2)}{dt^3} + \frac{d\left[(J_2+J_1)C_{12}\omega_2\right]}{dt}. \quad (14)$$

Подставим рассчитанные числовые значения и получим

$$124742\cdot M^* = \frac{d^3(2,4\cdot 12\omega_2)}{dt^3} + \frac{d\left[(12+2,4)124742\omega_2\right]}{dt}. \quad (15)$$

Так как это уравнение не содержит ω_2, то в качестве неизвестной функции берем $\varpi = \dot{\omega}_2$, тогда уравнение (15) принимает вид

$$124742\cdot M^* = 2,4\cdot 12\ddot{\varpi} + 14,4\cdot 124742\varpi.$$

Или $4331,3\cdot M^* = \ddot{\varpi} + 62371\varpi$.

Решение можно представить в виде суммы общего и частного решений дифференциального уравнения.

Общее решение: $\ddot{\varpi} + 62371\varpi = 0$.

Характеристическое уравнение в этом случае:

$$r^2 + 62371 = 0 \Rightarrow r = \pm\sqrt{-62731} = \pm 250j.$$

Тогда общее решение этого уравнения будет иметь следующий вид:

$$\varpi_{î áù} = Ń_1\cdot Ńos250t + Ń_2\cdot Sin250t.$$

Полное решение можно записать в виде:

$$\varpi = \varpi_{общ} + \varpi_{ч} = C_1\cdot Cos250t +$$

$$+C_2\cdot Sin250t + 4331M^*.$$

Возвращаемся к исходной переменной

$$\dot{\omega}_2 = \varpi = C_1 \cdot \mathrm{Cos}250t + \\ + C_2 \cdot \mathrm{Sin}250t + 4331M^*.$$

И, далее

$$\omega_2 = \int [C_1 \cdot \mathrm{Cos}250t + \\ + C_2 \cdot \mathrm{Sin}250t + 4331M^*]dt = \\ = \frac{C_1}{250} \cdot \mathrm{Sin}250t - \frac{C_2}{250} \cdot \mathrm{Cos}250t + \\ + 4331M^* t + C_3. \quad (16)$$

Решение задачи Коши позволило получить результат в виде

$$\omega_2 = -17,3M^* \cdot \mathrm{Sin}250t + \\ + 4331M^* t + 0,0838. \quad (17)$$

Анализ выражения (17) показывает, что при незначительной разности моментов, т.е. в установившемся режиме, описываемая система будет иметь допустимые колебания, и барабан будет вращаться с практически постоянной скоростью. На рис. 4 представлен график переходного процесса при малых отклонениях вращающего и статического моментов электропривода.

При значительных отклонениях указанных моментов в переходом процессе будут происходить колебания с высокой частотой и амплитудой, что отрицательно влияет на работу механизмов и управление процессом производства окатышей. Таким образом, рекомендуется подавать на вход электропривода воздействие, не способствующее возникновению высокочастотных колебаний.

Исходя из вышесказанного, одним из перспективных путей решения задачи автоматизации окомкования является разработка электропривода с улучшенными динамическими характеристиками, с применением многозонной импульсной модуляции в системе управления процессом производства окатышей.

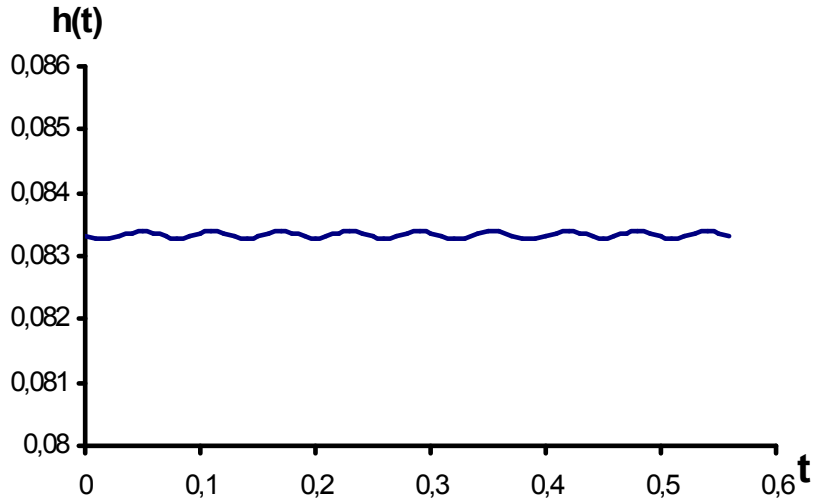


Рис. 4. График переходного процесса при малых колебаниях моментов M и M_{c2}

1. Теория управления окомкованием сыпучих материалов: монография / Е.А. Исаев, И.Е. Чернецкая, Л.Н. Крахт, В.С. Титов. Старый Оскол: ТНТ, 2004. 383 с.

2. Ключев В.И. Теория электропривода: учеб. для вузов. 2-е изд. перераб.и доп. М.:Энергоатомиздат, 1998. 704 с.

Получено 28.01.11

I. E. Chernetskaya, Candidate of Sciences, Associated Professor, Computer Science Chair, SWSU (e-mail: white731@yandex.ru)

RESEARCH OF THE ELECTRIC DRIVE INCLUDING DRUM-TYPE PELLETEZER AS OBJECT OF CONTROL

The present paper deals with hypothetical electric drive in which drum-type pelletezer is applied as object of control. The paper analyses the moments operating in the system, and their influence upon the quality of the process. It should be noted that system performance in influence by weight of the material in which drum-type pelletezer.

Keywords: *pelletizing, granular finely materials, which drum-type pelletezer.*

УДК 621.397

Л.Н. Виноградова, доцент кафедры ПО ЭВМ, ЧГУ (e-mail: lnvinogradova@bk.ru)

А.Н. Бажинов, инженер-программист, управление информационных технологий, Череповецкий государственный университет (e-mail: n_balex@mail.ru)

Е.В. Ершов, д-р техн.наук, профессор, проректор по учебной работе, профессор кафедры математического и программного обеспечения ЭВС, Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьева (e-mail: ershov@rgata.ru)

МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА АГЛОМЕРАТА НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

В статье описывается методика прогнозирования основного параметра качества агломерата – выхода годного. Дается обоснование применения нейросетевого подхода и нечетких множеств в системе прогнозирования качества агломерата. Также приведены результаты работы системы в условиях реального производства.

Ключевые слова: *агломерат, нейронная сеть, прогнозирование, нечеткое множество, качество.*

***

Специальное математическое обеспечение системы прогнозирования качества агломерата является совокупностью прикладных программ, предназначенных для реализации алгоритмов обработки информации, формирования рекомендаций и управления процессом, а также для связи с объектом управления и обслуживающим персоналом. В состав математического обеспечения должны входить следующие функциональные подсистемы:

- сбора и первичной обработки информации;
- анализа и прогнозирования;
- ведения справочно-информационного фонда;
- обмена информацией между системой прогнозирования и обслуживающим персоналом.

В подсистеме сбора и первичной обработки информации реализуются алгоритмы фрактального сжатия изображения излома агломерационного спека, сбора и первичной обработки входных и выходных параметров для создания ретроспективного банка данных, на основе которого система будет анализировать и выдавать прогноз.

В подсистеме анализа и прогнозирования используются алгоритмы и математические формулы для расчетов параметров процесса спекания шихты, комплексных количественных показателей состояния процесса, контроля параметров, анализа и прогнозирования хода технологического процесса производства агломерата.

Своевременное использование полученной информации даст возможность прогнозировать протекание исследуемого процесса агломерационного производства, вовремя предупредить нежелательное его развитие и внести соответствующее воздействие в систему управления спеканием шихты.

В целом эффективность системы прогнозирования в значительной степени определяется не только удачным выбором тех или иных элементов (телекамера, вычислительное устройство), но и знанием оптимальных значений параметров ее функциональных блоков. Поиск таких значений возможен с помощью математической модели, описывающей происходящие процессы при производстве агломерата [1].

На рис. 1 представлена информационная модель процесса спекания агломерата. С помощью этой модели определяются входные параметры, на основе которых система прогнозирования качества агломерата будет выдавать прогноз выхода годного агломерата.

Из рис. 1 видно, что в загрузочный бункер поступает смесь известняка, топлива, шлама, концентрата и возврата (мелкие частицы агломерата), где она перемешивается и поступает на увлажнение и окомкование, затем происходит загрузка шихты на паллеты. После этих этапов в систему прогнозирования поступают следующие параметры: начальная температура шихты ($t_ш$), доля топлива в шихте, доля известняка, доля возврата, влагосодержание шихты, высота насыпного слоя ($H_ш$). В процессе зажигания шихты с определенной температурой и скоростью газ проходит из горна сквозь слой шихты, сообщая ей некоторое количество тепла. В систему прогнозирования поступают параметры: скорость газа ($V_г$), температура газа в горне ($t_г$), мощность источника тепла ($q_т$). После этого начинается процесс спекания шихты, в ходе которого на вход системы прогнозирования поступают следующие параметры: скорость движения паллет ($V_п$), насыпная плотность шихты ($\rho_ш$), плотность газа ($\rho_г$), плотность воздуха ($\rho_в$), время зажигания ($t_з$). Это наиболее важны входные параметры с точки зрения их влияния на качество агломерата [2].

Метод прогнозирования выхода годного агломерата заключается в следующем: подсистема сбора и первичной обработки информации обрабатывает входные параметры и подает запрос в ретроспективную базу данных о совпадении входных параметров с имеющимися уже в базе. Вместе с входными параметрами в базе данных хранятся процент годного агломерата, который получился после спекания шихты с данными входными параметрами и сжатое фрактальным алгоритмом изображение излома агломерационного спека.

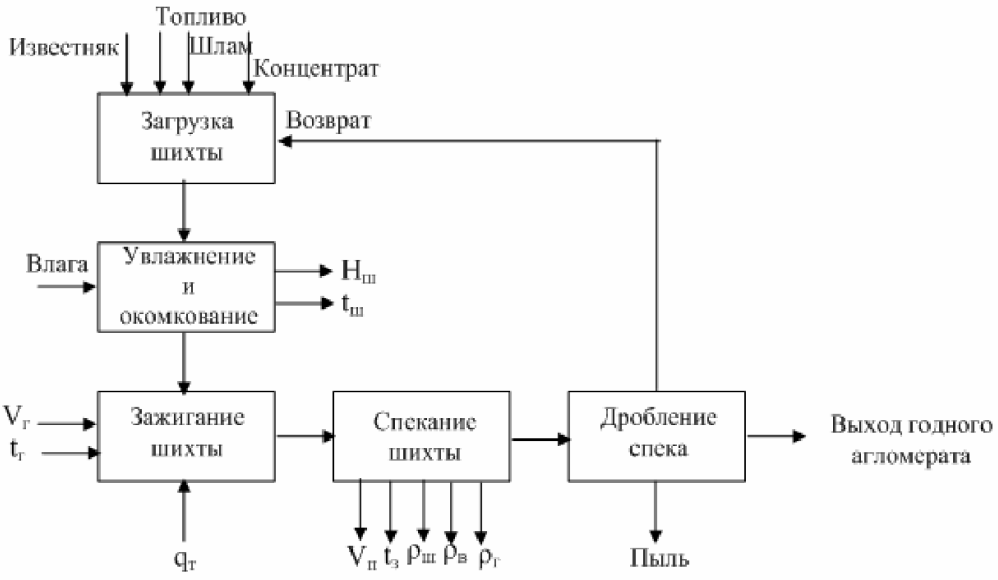


Рис. 1. Информационная модель процесса спекания агломерата

При совпадении параметров в ответ на запрос подсистема сбора и первичной обработки информации отправляет в подсистему анализа и прогнозирования файл с необходимой информацией. Затем запускается процесс декомпрессии изображения, а также осуществляется связь с подсистемой обмена информацией между системой прогнозирования и обслуживающим персоналом. В этом случае оператор получает на экран входные параметры, прогноз выхода годного агломерата, изображение излома аглоспека и рекомендации о способе регулирования процесса спекания, если выход годного агломерата выходит за пределы нормы. На основании многочисленных исследований при оптимальном ходе производственного процесса процент годного агломерата колеблется в пределах 61÷75 %. При увеличении выхода годного более 75 % наблюдается резкое ухудшение процесса спекания следующих партий шихты, т.к. доля возврата мала и это приводит к уменьшению газопроницательности шихты.

Оператор на основании прогноза и изображения излома агломерационного спека принимает решение о подаче управляющего воздействия в систему управления процессом спекания агломерата.

Если совпадения не произошло - подсистема анализа и прогнозирования подает входные параметры на входы обученной искусственной нейронной сети Кохонена. Сеть выдает прогноз выхода годного агломерата и рекомендации, которые также поступают к оператору и в подсистему сбора и первичной обработки информации.

На рис. 2 представлен обобщенный метод прогнозирования на основе информационной модели процесса спекания агломерата.

Прогнозирование - это ключевой момент при принятии решений в управлении. Конечная эффективность любого решения зависит от последовательности событий, возникающих уже после принятия решения. Возможность предсказать неуправляемые аспекты этих событий перед принятием решения позволяет сделать наилучший выбор, который, в противном случае, мог бы быть не таким удачным.

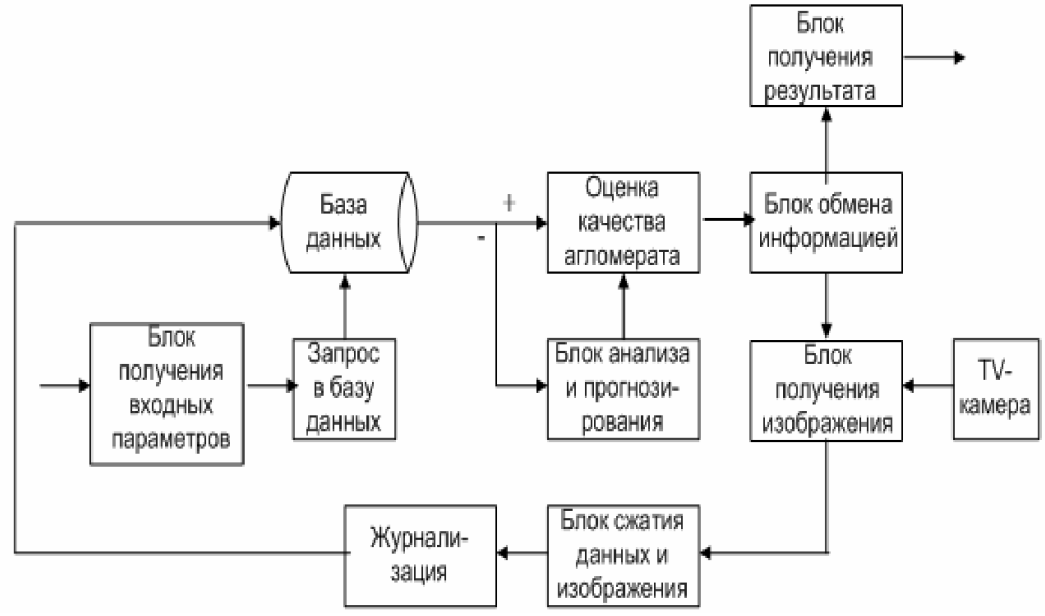


Рис. 2. Логическая модель метода прогнозирования

Так как агломерационный процесс является непрерывным металлургическим процессом, изменения параметров и условий процесса спекания агломерата во времени происходят медленно, то целесообразно использовать ретроспективные данные для предсказания выхода годного агломерата.

Прогнозирование выходных параметров агломерата относится к такому классу задач, где зависимость между входными и выходными переменными сложна и нахождение закономерностей в больших объемах статистических данных требует нетривиальных алгоритмов и занимает много времени. Наиболее эффективным средством решения задачи прогнозирования в условиях агломерационного производства будет использование нейросетевого подхода в качестве механизма прогнозирования.

Весь процесс прогнозирования можно разбить на этапы:

– сбор данных для обучения: для создания обучающей выборки были собраны экспериментальные данные по агломерационной машине в АГЦ № 3 ОАО «Северсталь»;

– подготовка и нормализация данных: исходные данные преобразуются к виду, в котором их можно подать на входы сети;

– выбор топологии сети: для решения задачи прогнозировании выхода годного агломерата, исходя из постановки задачи и имеющихся входных данных, была выбрана сеть Кохонена. В качестве активационной функции используется логистическая функция $F(x) = 1/(1 + e^{-x})$, центральная область которой, имеющая большой коэффициент усиления, решает проблему обработки слабых сигналов, в то время как области с падающим усилением на положительном и отрицательном концах подходят для больших возбуждений [3];

– экспериментальный подбор характеристик сети: на входной слой подаются восемнадцать параметров начала процесса производства агломерата. Количество кластеров – три. Соответствие между классами, выделенными сетью, и классами, существующими в предметной области, устанавливается человеком;

– экспериментальный подбор параметров обучения: обучение сети Кохонена происходит «без учителя». Каждые 15 мин снимаются показания с датчиков, термопар и влагомеров, состав шихты определяется с помощью лабораторного анализа и расчета каждый час, мощность тепла рассчитывается по формуле;

– собственно обучение: нахождение коэффициентов связей между нейронами. В процессе обучения нейронная сеть в определенном порядке просматривает обучающую выборку множество раз. Набор исходных данных делят на две части: собственно обучающую выборку и тестовые данные по произвольному принципу. Обучающие данные подаются сети для обучения, а проверочные используются для расчета ошибки сети. Если на проверочных данных ошибка уменьшается, то сеть действительно выполняет обобщение. Если ошибка на обучающих данных продолжает уменьшаться, а ошибка на тестовых данных увеличивается, значит, сеть перестала выполнять обобщение и просто «запоминает» обучающие данные;

– проверка адекватности обучения: как правило, после обучения нейросети осуществляется контрольное воспроизведение данных, составляющих обучающее множество. Для всех тестовых наборов строятся распределения весов и нейронов в виде разреженной матрицы весов. Входные параметры расположены в виде скоплений точек в непосредственной близости к нейрону, обозначенному в виде кружка. Нейрон-победитель выделен звездочкой в кружке, а входные данные, соответствующие нейрону-победителю – в виде звездочки (рис. 3).

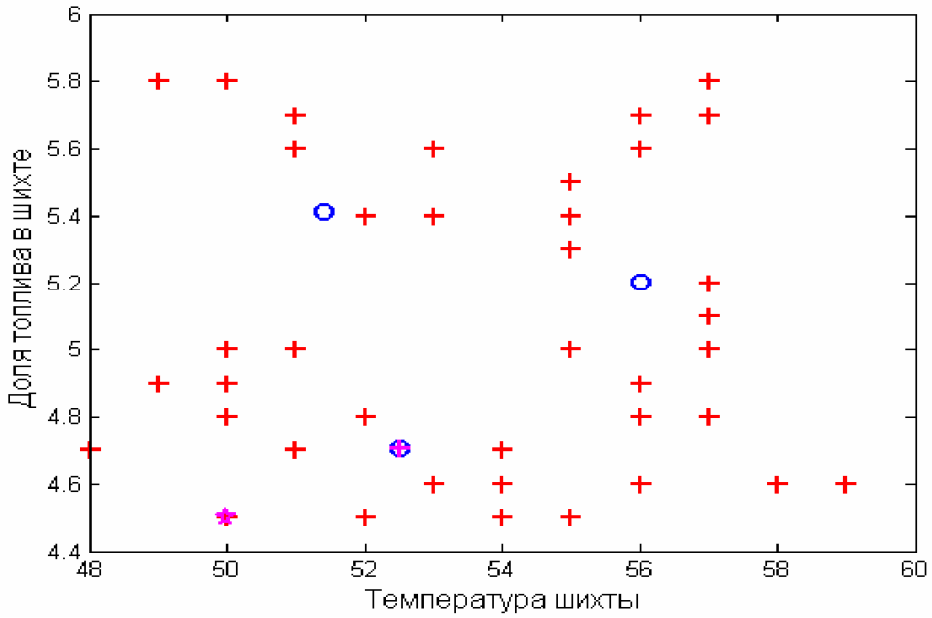


Рис. 3. Разреженная матрица весов тестового набора №1

На основании анализа разреженных матриц можно сделать вывод, что нейронная сеть обучена правильно и может быть использована для проведения экспериментальных исследований системы прогнозирования выхода годного агломерата в реальном агломерационном производстве АГЦ №3 ОАО «Северсталь».

После прохождения обучения и тестовых данных нейронная сеть способна осуществлять прогноз выхода годного агломерата в диапазонах, предусмотренных делением на кластеры (низкое качество – выход годного < 61 % и > 75%, среднее качество – выход годного от 61,1% до 67%, высокое качество – выход годного от 67,1% до 75 %) .

Альтернативным решением в рамках нейросетевого подхода является объединение нейронных сетей и нечеткой логики, результатом которого будет создание систем выработки решений, в разной степени реализующих идею нечеткого мышления в комплексе с заимствованной от нейронных сетей способностью к обучению.

Используемый модуль нейро-нечеткого управления имеет вид [4]:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^{N} \bar{y}^{k} \left(\prod_{i=1}^{n} \exp\left[-\left(\frac{\bar{x}_i - \bar{x}_i^{k}}{\sigma_i^{k}} \right)^2 \right] \right)}{\sum_{k=1}^{N} \left(\prod_{i=1}^{n} \exp\left[-\left(\frac{\bar{x}_i - \bar{x}_i^{k}}{\sigma_i^{k}} \right)^2 \right] \right)}, \quad (1)$$

где $\bar{y}^{k}$ - центр нечеткого множества B^k; N- количество нечетких правил; $x_1,..,x_n$ - входные переменные модели; $y_1,..,y_m$ - выходные переменные модели; $\bar{x}_i^{k}$ - центр гауссовской кривой; σ_i^{k} - ширина гауссовской кривой.

Каждый элемент формулы (1) можно задать в форме функционального блока (сумма, произведение, функция Гаусса), что после соответствующего объединения позволяет создать многослойную нейронную сеть (рис. 4).

Для упрощения на схеме показан модуль управления с двумя входами. Слои обозначены символами от L1 до L4 и выделены серым фоном. Мультипликаторы ($\prod$) перемножают все входные сигналы, сумматоры ($\sum$) суммируют

их, а элемент $\frac{a}{b}$ делит один сигнал на другой. Черные поименованные точки, размещенные на связях, обозначают веса этих связей. Элементы слоя L1 реализуют функцию Гаусса с параметрами $\overline{x}_i^k$ и σ_i^k. Выражения и стрелки, размещенные над схемой, определяют направление распространения сигнала и его интерпретацию. В представленной структуре выделены четыре слоя.

Слой 1 (L1). Каждый его элемент реализует функцию принадлежности нечеткого множества A_i^k, $i=1..n$, $k=1..N$.

Слой 2 (L2). Конфигурация связей этого слоя соответствует базе правил, а мультипликаторы - блоку вывода. На выходе слоя L2 формируется результат вывода в виде значения функции принадлежности $\mu_{\overline{B}^k}(y^k)$. Количество элементов этого слоя равно количеству правил N. Каждый узел связан с предыдущим слоем таким образом, что узел слоя L2, соответствующий k-му правилу, соединен со всеми узлами слоя L1, соответствующими нечетким множествам суждений этого правила.

Слои 3 (L3) и 4 (L4). Оба слоя представляют собой реализацию блока дефуззификации. Веса связей, доходящих до верхнего узла слоя L3 и обозначенные $\overline{y}^k$, интерпретируются как центры функций принадлежности нечетких множеств B^k. Эти веса, так же, как и значения параметров $\overline{x}_i^k$ и σ_i^k в слое L1, будут модифицироваться в процессе обучения. На выходе слоя L4 формируется «четкое» (дефуззифицированное) выходное значение модуля управления $\overline{y}$.

В рассмотренной выше структуре в каждом k-м правиле, $k=1..N$, учитывается предопределенное количество нечетких множестве A_i^k, $i=1..n$. Результат этого проявляется в большом количестве обрабатывающих элементов первого слоя (L1): это количество равно $n \times N$.

Однако изучение реальных систем показывает, что нечеткие множества одной и той же переменной оказываются весьма близкими друг другу (расстояния между их центрами невелики). Поэтому их можно заменить одним нечетким множеством.

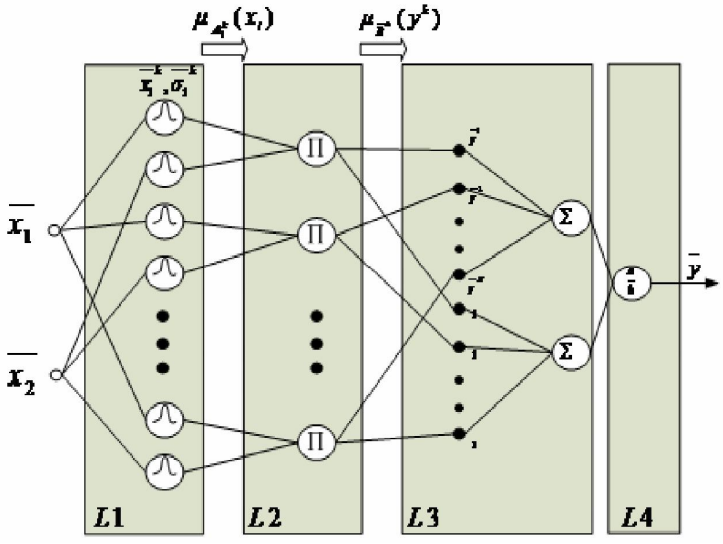


Рис.4. Схема реализации модуля нейро-нечеткого управления

Будем использовать следующую методику: вначале определяется фиксированное количество нечетких множеств для каждой переменной, и в последующем именно они и используются в правилах вывода.

Например, если некоторая лингвистическая переменная представляет выход годного агломерата, то для нее задается фиксированное количество нечетких множеств типа «очень низкий процент», «низкий процент», «оптимальный процент», «высокий процент» и именно на их основе формируются соответствующие правила. Пример модифицированного таким образом модуля управления представлен на рис.5. На нем видно, что в связях между слоями L1 и L2, отображающих структуру правил, одни и те же нечеткие множества A_i^k содержатся в различных правилах. Очевидно, что количество элементов в слое L1 на рис. 5 оказывается меньше, чем на рис. 4, тогда как количество элементов в слое L2 на обоих рисунках совпадает.

При проектировании двухвходового модуля управления при условии, что для каждого входа определяется четыре нечетких множества, количество узлов в первом слое на рис. 5 составит 4+4 = 8. В этом случае может быть построено максимум 4×4=16 правил. Если бы те же 16 правил использовались в немодифицированном модуле управления, то количество нечетких множеств (и, соответственно, количество узлов в первом слое) для тех же двух входов составило бы 2×16 =32. Выигрыш очевиден.

Аналогичные упрощения можно выполнить и в отношении нечетких множеств B^k.

Предложенным способом в задаче прогнозирования основного параметра качества агломерата – выхода годного можно весьма сократить время обучения модуля нейро-нечеткого управления, т.к. основных факторов, влияющих на качество оперативного прогноза, достаточно много и они поддаются рассмотренной модификации.

Экспериментальные исследования системы прогнозирования качества агломерата на основе искусственной нейронной сети осуществлялись в условиях реального агломерационного производства с целью проверки надежности и эффективности алгоритмов фрактального сжатия изображения излома аглоспека, входных данных и функционирования нейронной сети.

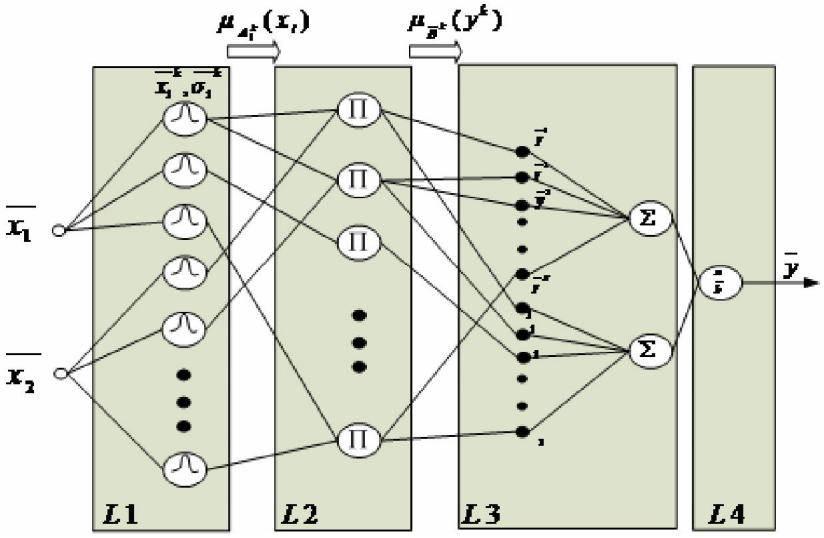


Рис. 5. Схема реализации модифицированного модуля нейро-нечеткого управления

Проведение экспериментальных исследований системы прогнозирования тесно связано с системой контроля подачи шихты в горн и системой контроля и управления спеканием агломерационной шихты.

Программная реализация алгоритмического обеспечения выполнена на базе интегрированной среды разработки приложений *C++ Builder 7.0*. Программное обеспечение работает под управлением операционной системы *MS Windows* 9*X*/2000/*NT*/*XP*/*7*.

Оценка адекватности результатов эксперимента выполнена с помощью критерия Фишера, при этом в агломерационном цехе № 3 ОАО «Северсталь» были проведены 560 опытов. На рис. 6 представлена гистограмма распределения классов качества агломерата.

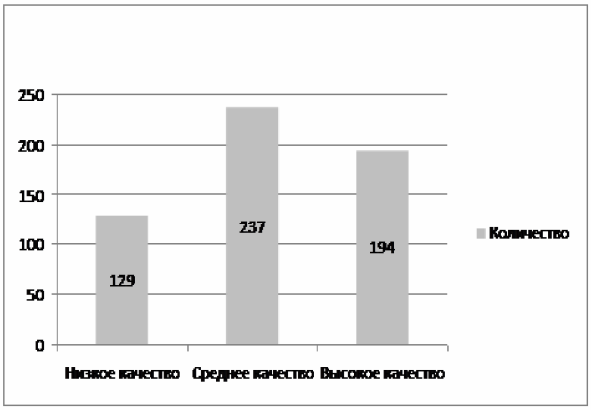


Рис. 6. Гистограмма распределения классов качества агломерата

Предложенный метод прогнозирования выхода годного агломерата позволяет уменьшить ошибку прогноза до 2÷5 %, расширяет функциональность и улучшает экономические показатели путем повышения оперативности принятия решений.

Список литературы

1. Виноградова Л.Н., Ершов Е.В., Шумилова Е.С. Определение функциональных требований к системе прогнозирования выходных параметров непрерывного технологического процесса производства агломерата // Вестник Череповецкого гос. ун-та. 2010. № 3. С. 123–127.

2. Коротич В.И., Фролов Ю.А., Бездежский Г.Н. Агломерация рудных материалов. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003. 400 с.

3. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. М.: Горячая линия - Телеком, 2001. 382 с.

4. Рутковская Д., Пилиньский Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / пер. с польск. И.Д. Рудинского. М.: Горячая линия – Телеком, 2006. С. 452.

Получено 14.02.11

L.N. Vinogradova, Candidate of Sciences, Associate Professor, Software of Computers Chair, Cherepovets State University (e-mail: lnvinogradova@bk.ru)

A.N. Bazhinov, Programmer, IT Department, Cherepovets State University (e-mail: n_balex@mail.ru)

E.V. Ershov, Vice-Rector, Professor, Mathematical and Software EMU Chair, Rybinskaya State Aviation Technology Academy, P.A. Solovyov (e-mail: ershov@rgata.ru)

The article describes how to predict the main parameter of sinter quality - the output of suitable. We justify the application of neural network approach and fuzzy sets in the prediction of sinter quality. Also the results of the system in terms of real production.

***Keywords**: agglomerate, a neural network, forecasting, fuzzy set, quality.*

УДК 62-50

А.А. Певзнер, д-р техн. наук, профессор, начальник управления инновационных технологий в обучении и научной работы Ярославского государственного педагогического университета им. К.Д. Ушинского (alpevzner@eandex.ru)

СИНТЕЗ САР С ЗАДАННЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ МЕТОДОМ ФУНКЦИЙ СОПРЯГАЮЩИХ ЧАСТОТ

В работе рассматривается применение разработанного автором метода функций сопрягающих частот для синтеза САР с заданными динамическими характеристиками путем выбора величины соответствующих параметров системы, обеспечивающих заданную ширину полосы пропускания.

Ключевые слова: *синтез, САР, сопрягающие частоты, полоса пропускания.*

***

Создание мобильных автоматических устройств, обеспечивающих заданные точность и быстродействие при ограниченных массогабаритных показателях и малом потреблении энергии, требует методов оптимального синтеза сложных САР. Под синтезом системы понимают такое ее исследование, в результате которого по заданным показателям качества находят необходимую структуру схемы, параметры ее элементов и способы реализации найденной структурной схемы [1, 3].

В большой мере вопросы управляемости и энергетической эффективности САР решаются обеспечением требуемой полосы частот САР. В процессе синтеза системы, обеспечивающей требуемую полосу, исходя из заданной структуры системы и АЧХ, необходимо выбрать такие значения параметров вибрационной системы, чтобы исключить значительное различие минимумов и максимумов АЧХ в области заданной полосы.

Для синтеза управляемых систем с заданными показателями наиболее широкое распространение получили частотные методы. Благодаря своей наглядности они широко используются и в настоящее время. Наиболее простым, наглядным и хорошо разработанным инженерным методом синтеза является метод логарифмических частотных характеристик [1,2].

Синтез методом ЛЧХ основан на связи переходной функции с вещественной частотной характеристикой (ВЧХ) замкнутой системы, которая связана с ЛАЧХ разомкнутой системы. Благодаря такой связи можно переходить от показателей качества к параметрам ВЧХ и к параметрам ЛАЧХ системы. Можно по заданным показателям качества системы (перерегулированию, времени регулирования, ошиб-ке в установившемся режиме) строить желаемую ЛАЧХ системы. Желаемой ЛАЧХ принято называть такую частотную характеристику системы, при которой обеспечиваются заданные показатели качества [1,2].

При синтезе корректирующего устройства САР методом ЛАЧХ обычно принят следующий порядок решения задачи [2].

Строят ЛАЧХ нескорректированной системы с учетом требуемого коэффициента усиления системы k_p в разомкнутом состоянии. Коэффициент k_p находят из условия получения ошибки в установившемся режиме не выше заданной.

По заданным показателям качества (перерегулирование $\sigma_{макс}$, время регулирования $t_{р.макс}$ и ошибка в установившемся режиме $\theta_{уст}(t)$) с учетом ЛАЧХ не скорректированной системы строят желаемую ЛАЧХ.

На основании желаемой ЛАЧХ и ЛАЧХ не скорректированной системы определяют ЛАЧХ корректирующего устройства. Для последовательного корректирующего устройства ЛАЧХ получают вычитанием ординат ЛАЧХ не скорректированной системы из ординат желаемой ЛАЧХ.

По полученной ЛАЧХ корректирующего устройства находят передаточную функцию корректирующего устройства и подбирают наиболее простой способ его реализации. Определяют параметры корректирующего устройства и его ЛАЧХ.

Строят окончательную ЛАЧХ скорректированной системы с учетом ЛАЧХ реального корректирующего устройства и определяют ее показатели качества.

Наиболее сложным и ответственным этапом при синтезе является построение желаемой ЛАЧХ.

Неудобства построения частотных характеристик возникают, когда систему не удается представить в виде отдельных звеньев. Определенные вычислительные трудности появляются при исследовании систем с выраженными резонансными свойствами, а также при исследовании систем, содержащих неминимально-фазовые звенья и перекрещивающиеся связи.

Традиционно реализация системы с желаемой ЛАЧХ обеспечивается за счет введения корректирующих звеньев в обратную связь. Однако при этом не учитывается ЛАЧХ силовой части САР, в том числе исполнительных механизмов, и при управлении данной САР требуется дополнительная энергия. Дополнительная энергия требуется для обеспечения компенсации «провалов» в ЛАЧХ силовой части системы. Поэтому, при синтезе, желательно осуществлять коррекцию ЛАЧХ за счет выбора наиболее оптимальных параметров силовой части системы.

В настоящее время не существует общих формализуемых методов синтеза систем с переменными параметрами. Это объясняется многообразием типов систем с различными задачами синтеза, а также трудностями аналитического исследования нелинейных систем. Поэтому поиск новых путей синтеза сложных систем с оптимальными параметрами продолжается.

Автором предложен метод функций сопрягающих частот, который позволяет решать задачи выбора оптимальных параметров при проектировании широкополосных колебательных систем [4-7].

В процессе проектирования, исходя из заданной структуры системы, необходимо выбрать такие значения параметров системы, чтобы обеспечить требуемую полосу пропускания частот. То есть обеспечить такие значения максимумов и минимумов АЧХ в пределах заданного диапазона частот, чтобы их разность не превышала заданного уровня.

При проектировании строится логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ).

Известно, что характер изменения аппроксимированной ЛАЧХ определяется совокупностью прямолинейных отрезков различного наклона, соединяющихся в точках сопряжения. Каждой такой точке соответствует так называемая частота сопряжения или сопрягающая частота. Сопрягающие частоты соответствуют нулям и полюсам передаточной функции данной системы.

Например, система с передаточной функцией

$$W = \frac{K \cdot \prod_{i=1}^{n_1} (T_i p + 1) \cdot \prod_{j=1}^{n_2} (T_j p^2 + 2\xi_j T_j p + 1)}{\prod_{k=1}^{m_1} (T_k p + 1) \cdot \prod_{l=1}^{m_2} (T_l p^2 + 2\xi_l T_l p + 1)} \quad (1)$$

имеет сопрягающие частоты

$\omega_i = 1/T_i$; $\omega_j = 1/T_j$;

$\omega_k = 1/T_k$; $\omega_l = 1/T_l$.

Для сопрягающих частот ω_j и ω_l могут наблюдаться существенные отклонения, за счет резонансов возрастания и антирезонансов провалов значения ЛАЧХ от идеализированной. Величины этих отклонений зависят от демпфирующих свойств соответствующих колебательных звеньев, характеризуемых коэффициентами затухания ξ_j и ξ_l. Очевидно, равномерность ЛАЧХ в заданном диапазоне частот будет зависеть от значений сопрягающих частот и коэффициентов затухания ξ_j и ξ_l. Следовательно, чтобы получить максимальную полосу необходимо выбрать такие параметры системы, чтобы обеспечить оптимальное расположение сопрягающих частот, соответствующих двучленам и трехчленам числителя и знаменателя передаточной функции (1) и коэффициенты затухания.

Однако трудность данной задачи заключается в том, что для сложной системы получить аналитическую зависимость сопрягающих частот от задаваемых параметров очень сложно, зачастую практически невозможно.

В предложенном автором методе [4-7] вводится понятие функции сопрягающих частот. Функции сопрягающих частот определяют характер изменения расположения сопрягающих частот ЛАЧХ в зависимости от изменения выбираемого параметра. Так как аналитически эти функции определить затруднительно, автором предлагается предварительно построить графически функции сопрягающих частот от задаваемых параметров. Для каждого из параметров строятся функции сопрягающих частот, соответствующих числителю (нули) и знаменателю (полюса) передаточной функции системы. В зависимости от расположения ветвей функций сопрягающих частот, можно судить, каким образом будет изменяться ЛАЧХ системы в зависимости от варьируемого параметра. На основании полученных функций можно выбрать параметры, обеспечивающие оптимальные значения сопрягающих частот.

При синтезе предлагается следующий порядок решения задачи.

1. Строится физическая модель системы.

2. Для полученной физической модели составляется система уравнений.

3. На основании полученной системы уравнений получают соответствующие передаточные функции.

4. Задают исходные значения параметров проектируемой системы и с помощью известных программ находят корни числителя (нули) и знаменателя (полюса) передаточной функции.

5. Задают области вариации соответствующих параметров и для различных значений параметров получают соответствующие значения корней.

6. Для полученных корней определяют сопрягающие частоты и строят графики их функций в зависимости от варьируемых параметров.

7. На основании полученных графиков выбирают предпочтительные значения требуемых параметров.

8. Для полученных значений параметров строят ЛАЧХ и при необходимости корректируют тот или иной параметр.

9. Строят окончательную ЛАЧХ скорректированной системы и определяют ее показатели качества.

Для построения функций сопрягающих частот необходимо привести передаточную функцию синтезируемой системы к виду (1), для чего необходимо найти корни числителя (нули) и знаменателя (полюса) передаточной функции.

Нахождение корней полиномов числителя и знаменателя в настоящее время реализуется довольно просто с помощью различных программных средств, например MathCAD.

В общем виде полученные корни можно представить в виде

$p_i = \alpha_i + j\beta_i$,

где β может быть как положительным, так и отрицательным.

Причем для колебательных звеньев корни парно комплексно сопряженные ($\alpha_i = \alpha_{i+1}$; $\beta_i = -\beta_{i+1}$), для апериодических ($\alpha_i \neq \alpha_{i+1}$; $\beta_i = \beta_{i+1} = 0$).

На основании полученных корней определяются значения сопрягающих частот

$$\omega_i = \sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2}\,, \qquad (2)$$

и коэффициентов демпфирования

$$\xi_i = \frac{\alpha_i}{\sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2}}\,. \qquad (3)$$

Функции сопрягающих частот представляют собой зависимости вычисленных значений сопрягающих частот от варьируемого параметра. Для удобства дальнейшего построения ЛАЧХ САР, функции сопрягающих частот целесообразно построить в виде графиков. При этом значения варьируемого параметра откладываются по оси ординат, а частота, в логарифмическом масштабе, откладываются по оси абсцисс.

Например, для механической части исполнительного механизма САР, содержащего три инерционные массы, передаточная функция имеет вид

$$W_4(p) = W_1(p)\cdot p = \frac{y_п(p)}{F(p)}\cdot p =$$

$$= p\cdot\frac{(m_T p^2 + D_T p + k_T)\cdot}{(m_T p^2 + D_T p + k_T)\cdot((m_П p^2 + D_г p + Dp + D_T p + k_г + k + k_T)\cdot}$$

$$\frac{\cdot mp^2 -}{\cdot(mp^2 + Dp + k) - (Dp + k)^2) - (D_1 p + k_1)\cdot((Dp + k)\cdot(D_T p + k_T) +}$$

$$\frac{-(D_1 p + k_1)\cdot}{+(D_1 p + k_1)\cdot(m_П p^2 + D_г p + Dp + D_T p + k_г + k + k_T)) -}$$

$$\frac{\cdot((D_T p + k_T) + (D_1 p + k_1))}{-(D_T p + k_T)\cdot((Dp + k)\cdot(D_1 p + k_1) + (mp^2 + Dp + k)\cdot(D_T p + k_T))}. \quad (4)$$

Задавая различные значения параметров m, $m_п$, $m_т$, k, $k_г$, $k_т$, D, $D_г$, $D_т$, численными методами определяем корни полиномов числителя и знаменателя. Диапазон изменения соответствующего параметра выбираем исходя из условия существенного изменения значений корней (хотя бы пары). Для полученных корней с помощью выражений (2) и (3) определяем значения сопрягающих частот ω_i - ω_l и коэффициентов демпфирования. Вычисленные значения сопрягающих частот в зависимости от варьируемого параметра представляем в виде графиков функций сопрягающих частот.

Воспользовавшись полученными графиками функций сопрягающих частот, можно довольно просто выбрать соответствующие параметры, синтезируемой САР, обеспечивающие желаемую полосу частот.

Для этого необходимо по графикам функций сопрягающих частот выбрать такое значение параметра, чтобы обеспечить оптимальное расположение сопрягающих частот. Под оптимальным расположением сопрягающих частот будем понимать такое их расположение, которое обеспечивает заданную полосу пропускания. То есть необходимо так расположить сопрягающие частоты, чтобы в заданной полосе частот было минимальное изменение амплитуды колебаний. В идеале желательно иметь на данном участке горизонтальную асимптоту ЛАЧХ.

Построение желаемой ЛАЧХ осуществляется следующим образом.

1. Задается значение варьируемого параметра.

2. Для данного значения варьируемого параметра по графикам функций сопрягающих частот определяются значения сопрягающих частот.

3. Затем, на основании известной методики [2], отмечаются полученные значения сопрягающих частот на оси частот.

4. На частоте $\omega = 1$ откладывается ордината, равная $20\lg k$, где k – коэффициент передачи системы (точка А).

5. Через точку А проводится прямая с наклоном равным $\nu\cdot 20$ Дб/дек, где ν – порядок астатизма системы.

6. После каждой из частот сопряжения наклон ЛАХ изменяется на -20 Дб/дек (-40 Дб/дек) если эта частота сопряжения ω_k (ω_l) определяется постоянной времени соответствующего двучлена (трехчлена) знаменателя или на 20 Дб/дек (40 Дб/дек) если эта частота сопряжения ω_i (ω_j) определяется постоянной времени соответствующего двучлена (трехчлена) числителя.

В зависимости от коэффициента затухания ξ в соответствующих точках сопряжения вводятся поправки, повышающие или понижающие величину ЛАХ в этих точках. Поправки можно не вводить, если значения ξ находятся в пределах $0{,}38 \le \xi \le 0{,}7$ [3].

Предложенный метод функций сопрягающих частот дает возможность в процессе проектирования достаточно просто выбрать оптимальное значение соответствующего параметра. Кроме того, метод позволяет наглядно представить влияние изменения соответствующего параметра на характеристики системы, и в случае синтеза САР управляемой за счет изменения соответствующего параметра определить пределы изменения управляющего параметра.

Список литературы

1. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования / под ред. В.В. Солодовникова. М.: Машиностроение, 1967. Кн. 1,2; 1969. Кн. 3.

2. Зайцев Г.Ф., Костюк В.И., Чинаев П.И. Основы автоматического управления и регулирования. Киев: Техніка, 1975. 496 с.

3. Алгоритмическое проектирование систем на основе аналогового моделирования: учеб. пособие / В.Г. Выскуб, В.С. Целищев, С.М. Зайдель, В.С. Титов; под ред. В.Г. Выскуба. Курск, 2006. 80.

4. Певзнер А.А. Синтез вибрационной системы методом функций сопрягающих частот // Вибрационные машины и технологии: сб.науч.тр. в 2 ч. /редкол.: С.Ф. Яцун (отв. ред.) [и др.] ;Курск.гос. техн.ун-т. Курск, 2005. Ч.1. С.262- 265.

5. Певзнер А.А. Синтез широкополосных систем // Известия Тульского государственного университета. Серия Вычислительная техника. Информационные технологии. Системы управления. Вып. 1. Вычислительная техника. 2006. С.122-126.

6. Певзнер А.А. Метод синтеза сложных систем // Тезисы докладов 5-й междунар. конф. «Авиация и космонавтика-2006». 23-26 октября 2006 года. Москва. М.: МАИ, 2006. С.26.

7. Певзнер А.А. Применение метода функций сопрягающих частот для синтеза систем с заданными частотными характеристиками // Управляемые вибрационные технологии и машины: сб. науч. ст.: в 2. ч. КГТУ. Курск, 2010. Ч. 2. С. 158-163.

Получено 26.01.11

A.A.Pevzner, Doctor of Sciences, Professor, Head of Innovative Technologies in Training and Scientific Work Department, Yaroslavl State Pedagogical University Named after K.D.Ushinskiy (e-mail: alpevzner@eandex.ru)

SYNTHESIS CAP WITH THE SET DYNAMIC CHARACTERISTICS A METHOD OF FUNCTIONS OF INTERFACING FREQUENCIES

The summary: In the work is considered the application, developed by the author, a method of functions of interfacing frequencies for synthesis SAC with the set dynamic characteristics by means of a choice of size of corresponding system parameters providing the set width of a passband.

Keywords: *Synthesis, SAC, interfacing frequencies, a passband.*

УДК 621.391

С.И. Егоров, д-р техн. наук, профессор кафедры вычислительной техники, ЮЗГУ
(e-mail: sie58@mail.ru)

ПОШАГОВОЕ ДЕКОДИРОВАНИЕ ВЫКОЛОТЫХ КОДОВ РИДА-СОЛОМОНА

Предложена процедура пошагового декодирования выколотых кодов Рида-Соломона, предназначенная для гибридных FEC+ARQ систем защиты от ошибок телекоммуникационных каналов. Процедура предусматривает восстановление выколотых символов на первых шагах одновременно с исправлением ошибок. Рассмотрен декодер, реализующий предложенную процедуру, отличающийся простой аппаратной реализацией, высокой пропускной способностью и минимальной задержкой декодирования.

Ключевые слова: выколотые коды Рида-Соломона, пошаговое декодирование, декодер.

***

Введение

В телекоммуникационных системах широко используются методы повышения достоверности передачи данных, предусматривающие обнаружение ошибок в принятых данных при помощи контрольной последовательности CRC (Cyclical Redundancy Check) и формирование автоматического запроса повторения ARQ посылки данных (Automatic Repeat Request).

Привлекательность этих методов – в простоте реализации. Однако они обладают существенным недостатком: при высоком уровне ошибок, возникающих в канале передачи данных, возникает большое число переспросов, что уменьшает эффективность используемого канала. Для борьбы с этим явлением используют гибридные системы защиты от ошибок FEC (Forward Error Correction) + ARQ [1]. Такие системы предусматривают исправление наиболее часто встречающихся ошибок с помощью корректирующих ошибки кодов (ECC), ARQ – запрос формируется лишь тогда, когда корректирующий код не справляется с ошибками.

Для более эффективного использования канала связи целесообразно по ARQ – запросу не передавать заново блок данных, в котором обнаружены неисправимые ошибки, а передать дополнительные контрольные символы корректирующего кода, позволяющие исправить неисправимые ранее ошибки. Такие системы могут быть построены на базе применения выколотых кодов Рида-Соломона (РС-кодов).

В данной работе предлагается процедура пошагового декодирования выколотых РС-кодов, предусматривающая восстановление выколотых символов на первых шагах. Процедура использует технику неполного вылавливания ошибок для кодов Рида-Соломона, введенную в [2,3]. Рассмотрен декодер, реализующий предложенную процедуру.

Особенности использования выколотых кодов Рида-Соломона в гибридных FEC + ARQ системах

РС-коды (n,k,d), определенные над конечным полем CF(q), позволяют гарантированно исправлять t ошибочных символов в кодовом слове, состоящем из n символов, для $t = \lfloor (d-1)/2 \rfloor$ (k – количество информационных символов в слове, d=n-k+1 – минимальное кодовое расстояние). РС-код определяется с помощью порождающего многочлена:

$$G(x) = (x - \alpha^b)(x - \alpha^{b+1})...(x - \alpha^{b+r-1}),$$

где α – примитивный элемент поля CF(q); $q=2^m$; b – целочисленная константа; r=n-k – количество контрольных символов в кодовом слове и $\alpha^b, \alpha^{b+1}, ..., \alpha^{b+r-1}$ – корни порождающего многочлена.

Выколотые РС-коды (n,k,d,p) получаются из обычных РС-кодов удалением

p проверочных символов из кодового слова. При этом минимальное кодовое расстояние выколотого РС-кода уменьшается: d'=d-p.

Выколотые РС-коды в гибридных FEC + ARQ системах должны позволять исправлять t ошибок и обнаруживать дополнительно τ ошибок. Еще лучше, если декодер будет реализовывать декодирование по ограниченному расстоянию t при $d'=2t+1+\tau$.

В случае невозможности исправления всех ошибок в принятом слове (когда их число больше t) уменьшают степень выкалывания кода. Выбирается новое большее значение числа исправляемых ошибок t', для него рассчитывается новое значение p $p'=d-1-2t'-\tau$. Кодовое слово нового выколотого кода (n,k,d,p') получается из ранее принятого кодового слова добавлением к нему p-p' контрольных символов, переданных через канал по ARQ-запросу. В предельном случае степень выкалывания уменьшается до нуля и выколотый РС-код превращается в обычный.

Возможны различные стратегии использования выколотых кодов в системах с ARQ:

1. Адаптивный выбор p из множества значений $\{0, 2, 4, \ldots, p_{max}\}$ в зависимости от качества канала.

2. Использование выколотых кодов с фиксированным значением p в случае канала хорошего качества, в случае ухудшения качества канала – передача полного слова кода.

В сетях с коммутацией пакетов декодеры РС-кодов могут быть использованы не только в оборудовании конечного пользователя (ООД), но и в оборудовании коммутации данных (ОКД).

На рисунке 1 показано включение декодера РС-кода в состав ОКД (ретранслятора, коммутатора, маршрутизатора), обеспечивающее минимальную задержку декодирования. В составе декодера можно выделить два основных блока: схему формирования синдромов (в широком смысле этого слова) СФС и вычислитель значений и локаторов ошибок ВЗЛО. Подключение СФС к входному порту позволяет вычислять синдромы одновременно с записью кодового слова в память. Они готовы для дальнейшей обработки сразу после завершения приема слова. Наличие ОЗУ синдромов обусловлено необходимостью сохранять их значения по окончанию приема слова выколотого кода для обеспечения модификации синдромов после приема дополнительных контрольных символов. Это же ОЗУ может быть использовано для реализации возможности работы с перемеженными символами кодовых слов.

Характеристики декодера выколотых РС-кодов определяются в основном характеристиками ВЗЛО.

Пошаговые ВЗЛО обеспечивают высокое быстродействие и минимальную задержку декодирования, они начинают исправлять ошибки в данных в темпе их вывода в выходной порт сразу же после завершения приема данных в буферное ОЗУ. Использование пошаговых ВЗЛО, использующих исключение выколотых символов как стираний, в декодерах выколотых РС-кодов рассматривается в [4]. За счет схемы исключения выколотых символов и схемы коррекции Y сложность ВЗЛО [4] увеличивается с увеличением p. Ниже будет предложен ВЗЛО, сложность которого не зависит от p.

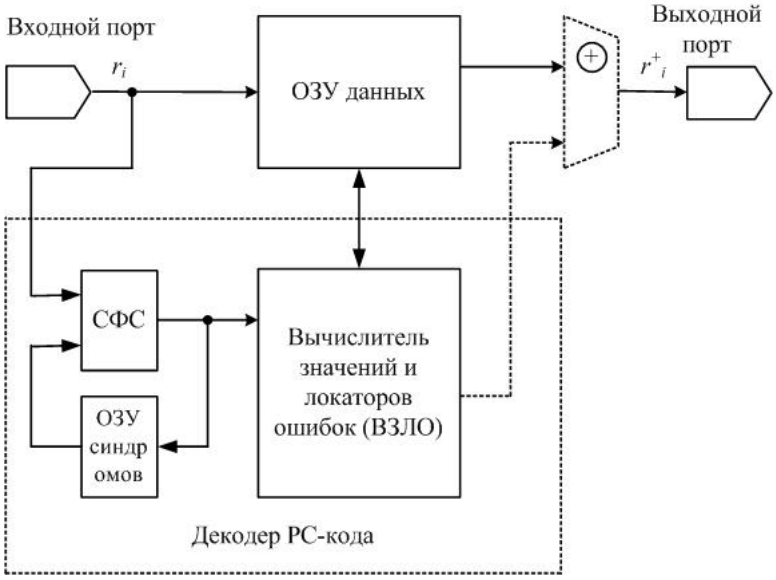


Рис. 1. Схема включения декодера РС-кода в ретранслятор (коммутатор, маршрутизатор) данных

Процедура пошагового РС-кодов с восстановлением выколотых символов

Пошаговое декодирование выколотых РС-кодов с восстановлением выколотых символов основывается на методе пошагового декодирования, использующем технику неполного вылавливания ошибок [2,3]. Коротко опишем этот метод, следуя [3].

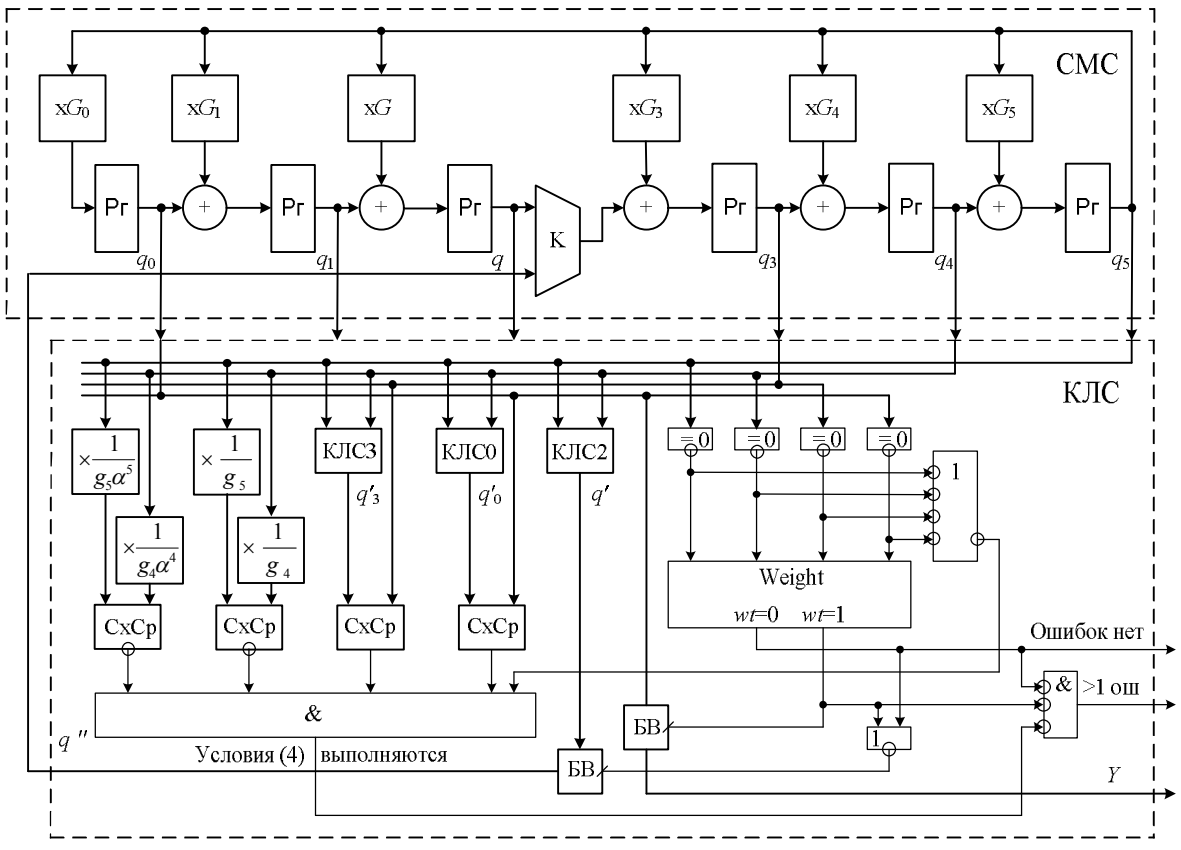


Рис. 2. Структурная схема ВЗЛО пошагового декодера с восстановлением выколотых символов РС-кода

В качестве синдрома в [3] используется многочлен остатка q(x):

$$q(x) = Res_{G(x)}(r(x)), \quad (1)$$

где r(x) – многочлен принятого из канала кодового слова; G(x) – порождающий многочлен РС-кода; $Res_b(a)$ обозначает остаток от деления a на b.

Каждый шаг процедуры декодирования соответствует циклическому сдвигу принятого кодового слова. Для сдвинутого кодового слова вычисляется значение ошибки в фиксированном проверочном символе, как функции Y=f(q(x)). Это значение прибавляется к символу r_{n-v} (v – номер шага) принятого кодового слова. После чего модифицируется значение синдрома по формуле (2) и осуществляется переход к следующему шагу.

$$q''(x) = Res_{G(x)}(x \cdot q(x)). \quad (2)$$

Функция Y=f(q(x)) в [3] получена на основе использования следующей теоремы и следствий из нее.

Теорема. Пусть два произвольно выбранных коэффициента q_i и q_j полинома остатка q(x), все коэффициенты которого ненулевые, имеют свойства:

$$q_i/g_i \neq q_j/g_j, \quad q_i/(g_i a^i) \neq q_j/(g_j a^j).$$

Смежный класс РС-кода имеет лидер веса 1 с ненулевой компонентой, расположенной в информационной части слова, тогда и только тогда, когда другие d-3 коэффициента полинома остатка q(x) связаны с выбранными коэффициентами следующим образом:

$$q_l = g_l a^l (a^i + a^j)/[q_i^{-1} g_i a^i (a^l + a^j) + q_j^{-1} g_j a^j (a^i + a^l)], \quad l = 0,..,d-2;\ l \neq i,j,$$

где $g(x) = \prod_{j=b+1}^{b+d-2} (x - \alpha^j) = \frac{G(x)}{(x - \alpha^b)} = \sum_{j=0}^{d-2} g_j x^j$.

Следствие 1. Пусть в информационной части кодового слова РС-кода произошла одна ошибка. Тогда справедливо следующее:

$$q_i^{-1} g_i a^i (a^l + a^j) + q_j^{-1} g_j a^j (a^i + a^l) + q_l^{-1} g_l a^l (a^i + a^j) = 0. \quad (3)$$

где q_i, q_j, q_l – произвольно выбранные коэффициенты полинома остатка q(x).

Уравнение (3) не может выполняться при наличии двух ошибок в информационной части кодового слова.

Следствие 2. Если в первых n-1 символах кодового слова РС-кода произошло t ошибок (1<t<d-2), то следующая система уравнений не может выполняться:

$$q_i \neq 0, \quad q_j \neq 0,$$
$$q_i/g_i \neq q_j/g_j,\ q_i/(g_i a^i) \neq q_j/(g_j a^j), \quad (4)$$
$$q_l = g_l a^l (a^i + a^j)/[q_i^{-1} g_i a^i (a^l + a^j) + q_j^{-1} g_j a^j (a^i + a^l)],$$
$$l = 1,..,d-2,\ l \neq i,j,$$

где i и j любые ненулевые неравные друг другу целые числа меньшие d-1.

Для того, чтобы предложенный в [2,3] подход к пошаговому декодированию можно было применить к декодированию выколотых РС-кодов, необходимо устранить влияние выколотых символов на многочлен остатка q(x).

В начале процедуры пошагового декодирования выколотые символы искажают p компонент многочлена остатков q(x). В дальнейшем при модификации синдрома по формуле (2) они исказят все компоненты многочлена q(x), делая невозможным вылавливание ошибок.

Чтобы это не произошло необходимо при модификации синдрома на p первых шагах процедуры коррекции ошибок вычислять правильное значение q_p'', что эквивалентно восстановлению выколотых символов. Это можно сделать, используя следствия из Теоремы [3].

Вычисление значения ошибки Y на каждом шаге при пошаговом декодировании выколотых РС-кодов осуществляется в соответствии с техникой вылавливания ошибок с учетом наличия на первых шагах в многочлене остатка q(x) компонент, искаженных выколотыми символами.

Для получения функций $q_p''=\psi(q_p(x))$ и $Y=f(q_p(x))$ (многочлен $q_p(x)$ получается из многочлена $q(x)$ удалением компонент, соответствующих выколотым символам) в случае декодирования выколотого РС-кода с $d'=5$ рассмотрим возможные ситуации размещения ошибок в кодовом слове.

1. В кодовом слове нет ошибок. Эта ситуация легко определяется по весу многочлена остатков: $wt(q_p(x))=0$, поскольку $q_p(x)=0$.

В этом случае можно восстановить выколотый символ $r_{p-v}=q_p$ и устранить его влияние на многочлен остатков $q_p=0$. При этом значение ошибки $Y=0$.

2. В кодовом слове произошла одна ошибка, и она расположена в контрольной части кодового слова. Эта ситуация определяется по весу многочлена остатков: $wt(q_p(x))=1$, поскольку отличается от нуля только один компонент многочлена $q_p(x)$, соответствующий позиции ошибки (его значение дает значение ошибки).

Ошибка не влияет на компонент многочлена остатков q_p, равный в данном случае соответствующему выколотому символу. При этом можно восстановить выколотый символ $r_{p-v}=q_p$ и устранить его влияние на многочлен остатков $q_p=0$. Значение ошибки в нулевой позиции равно $Y=q_0$.

3. В кодовом слове произошла одна ошибка, и она расположена среди информационных символов слова. Эта ситуация определяется в соответствии со Следствием 2 путем проверки выполнения условий (4), которые должны выполняться в данном случае. При этом $wt(q_p(x))=4$.

В этом случае компоненту q_p можно представить в виде $q_p=q'_p+r_{p-v}$, где q'_p – компонента остатка от деления многочлена ошибки в информационной части, которую в соответствии со Следствием 1 можно найти, используя формулу (3). При этом значение ошибки $Y=0$.

4. В кодовом слове произошло более 1, но менее 4 ошибок. Эта ситуация определяется в соответствии со Следствием 2 путем проверки выполнения условий (4), которые в данном случае не могут выполняться.

Теперь можно записать выражения для вычисления Y и q_p''.

$$q_p'' = \begin{cases} 0, \text{ если } wt(q(x)) \le 1 \\ g_p\alpha^p(\alpha^i+\alpha^j)/[q_i^{-1}g_i\alpha^i(\alpha^p+\alpha^j)+ \\ \quad +q_j^{-1}g_j\alpha^j(\alpha^p+\alpha^i)], \\ \quad \text{если } wt(q(x)) > 1, \end{cases} \quad (5)$$

$$Y = f(q_p(x)) = \begin{cases} q_0, \text{ если } wt(q(x)) = 1 \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases} \quad (6)$$

Сигнал обнаружения числа ошибок больше одной формируется, если не выполняются соотношения (4) и $wt(q(x))>1$.

Пример процесса декодирования слова $r(x) = \alpha^9x^5+x^6+\alpha^9x^5+\alpha^{12}x^4+\alpha^1x^3$ выколотого РС-кода (15,9,7,2) показан в таблице.

Пример пошагового декодирования выколотого РС-кода (15,9,7,2)

№	X	q(x)	$wt(q_p(x))$	q_3'	q_2''	q_0'	Y
1	α^{14}	$\alpha^7x^5+\alpha^5x^4+\alpha^{12}x^3+\alpha^9x+\alpha^1$	4	α^{12}	α^4	α^1	0
2	α^{13}	$\alpha^2x^5+\alpha^6x^4+\alpha^5x^3+\alpha^6x+\alpha^7$	4	α^5	α^0	α^7	0
3	α^{12}	$\alpha^1x^5+\alpha^{12}x^4+\alpha^{14}x^3+\alpha^{12}x^2+\alpha^{10}x+\alpha^2$	4	α^{14}	α^{12}	α^2	0
4	α^{11}	$\alpha^3x^5+\alpha^2x^4+\alpha^7x^3+\alpha^{12}x^2+\alpha^1x+\alpha^1$	4	α^7	α^{12}	α^1	0
5	α^{10}	$\alpha^7x^5+\alpha^9x^4+\alpha^6x^3+\alpha^2x^2+\alpha^{14}x+\alpha^3$	4	α^6	α^2	α^3	0
6	α^9	$\alpha^3x^5+\alpha^{12}x^4+\alpha^0x^3+\alpha^4x^2+\alpha^5x+\alpha^7$	4	α^0	α^4	α^7	0
7	α^8	α^3	1	α^3	0		α^3
8	α^7	0	0		0		0
…							
15	α^0	0	0		0		0

В примере используется РС-код (n,k,d,p)=(15,9,7,2), определенный над полем Галуа GF(2^4) с порождающим поле многочленом x^4+x+1. Для этого кода порождающий многочлен $G(x) = x^6+ \alpha^9x^5+ +\alpha^{12}x^4+\alpha^1x^3+\alpha^2x^2+\alpha^4x+1$ и вспомогательный многочлен $g(x) = x^5+\alpha^7x^4+\alpha^2x^3+ +\alpha^5x^2+\alpha^1x+1$. Исправление ошибок реализовано применительно к символу r_0. В качестве базовых коэффициентов многочлена остатка q(x) используются q_5 и q_4.

Слово содержит один ошибочный символ (седьмой в слове) с локатором ошибки α^8 и значением ошибки α^3. Во время первых двух шагов из многочлена остатка устраняется влияние двух выколотых символов путем вычисления q_2" и ввода его в q(x). На седьмом шаге вес $q_p(x)$ становится равным 1, и Y определяется в соответствии с формулой (6), как $Y=q_0 = \alpha^3$. На этом шаге исправляется единственный ошибочный символ кодового слова.

ВЗЛО пошагового декодера выколотых РС-кодов (n,k,7,2)

Структурная схема ВЗЛО (t=1, τ =2) пошагового декодера выколотых РС-кодов (n,k,7,2) приведена на рисунке 2. В верхней части рисунка изображена схема модификации синдрома (СМС) в нижней комбинационно-логическая схема (КЛС) вычисления значений q_2" и Y.

Перед началом исправления ошибок компоненты остатков q_2 и q_1 должны соответствовать выколотым символам r_1 и r_0 соответственно, при этом компонент q_0, будет соответствовать символу r_{n-1}. Для этого достаточно, чтобы схема модификации синдрома (многочлена остатка q(x)) выполнила один предварительный шаг с отключенной схемой КЛС.

На первом шаге работы ВЗЛО осуществляется проверка с помощью КЛС наличия в кодовом слове более 1 ошибки. При обнаружении такой ситуации осуществляется отказ от декодирования.

На первых p шагах осуществляется восстановление выколотых символов. При этом на каждом шаге убирается влияние выколотого символа на компоненту q_p (q_2) многочлена остатков. Новое значение q_p" вычисляется КЛС и загружается через коммутатор (К) в соответствующий регистр СМС.

На каждом шаге осуществляется проверка наличия ошибки и вычисление ее значения Y в соответствующем символе кодового слова.

Сложность ВЗЛО и его основные характеристики определяются комбинационно-логической схемой, вычисляющей значение ошибки Y на каждом шаге, новое значение q_2" и обнаруживающей дополнительные ошибки. Проверка выполнения соотношений (4) реализуется с помощью 4 умножителей элементов поля на постоянные коэффициенты ($x(g_5\alpha^5)^{-1}$, $x(g_4\alpha^4)^{-1}$, $x(g_5)^{-1}$, $x(g_4)^{-1}$), комбинационно-логической схемы вычисления значения q_3' (КЛС3)

$$q'_3 = \frac{g_3\alpha^3(\alpha^5+\alpha^4)}{[q_5^{-1}g_5\alpha^5(\alpha^3+\alpha^4)+q_4^{-1}g_4\alpha^4(\alpha^3+\alpha^5)]},$$

комбинационно-логической схемы вычисления значения q_0' (КЛС0)

$$q'_0 = \frac{g_0\alpha^0(\alpha^5+\alpha^4)}{[q_5^{-1}g_5\alpha^5(\alpha^0+\alpha^4)+q_4^{-1}g_4\alpha^4(\alpha^0+\alpha^5)]},$$

4 схем сравнения элементов поля на равенство (СхСр) и пятивходового логического элемента И (см. правый нижний угол рис. 2). Вычисления по формуле (5) реализуются с помощью комбинационно-логической схемы вычисления значения q_2' (КЛС2)

$$q'_2 = \frac{g_2\alpha^2(\alpha^5+\alpha^4)}{[q_5^{-1}g_5\alpha^5(\alpha^2+\alpha^4)+q_4^{-1}g_4\alpha^4(\alpha^2+\alpha^5)]},$$

блока вентилей (БВ), схемы анализа веса и двухвходового элемента ИЛИ. Вычис-

ления по формуле (6) реализуются с помощью блока вентилей и схемы анализа веса (Weight).

Сложность КЛС ВЗЛО (основной нетривиальной его части) определяется следующим образом: $\chi_В=37m+18$ и $\chi_П=9\cdot 2^m\cdot m$ ($\chi_В$ – число вентилей, $\chi_П$ – число бит памяти (ПЗУ)). Сложность декодера в отличии от декодера [4] не увеличивается с увеличением p.

Пропускная способность рассмотренного декодера с учетом временного мультиплексирования при обработке синдрома дается следующей формулой:

$$v_д = m\cdot f_{CLK}/2,$$

где f_{CLK} – тактовая частота, на которой работает декодер.

При реализации вычислений над полем $GF(2^8)$ декодер может корректировать ошибки в потоке данных, передаваемых со скоростью 400 Мбит/с при работе на тактовой частоте 100 МГц.

Выводы

Рассмотренный пошаговый ВЗЛО отличается простой аппаратной реализацией, высокой пропускной способностью и минимальной задержкой декодирования. Он может быть рекомендован для использования в составе комбинированного ВЗЛО вместе с ВЗЛО декодера [5] или процессорным ВЗЛО.

Пошаговый ВЗЛО будет быстро исправлять часто встречающие ошибки небольшой кратности. Второе ВЗЛО при этом будет исправлять ошибки большей кратности. Комбинированные ВЗЛО позволяют обеспечить невысокую аппаратную сложность при хороших характеристиках исправления ошибок.

Список литературы

1. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных. М.: Мир, 1989. 544 с.

2. Егоров С.И. Алгоритмы пошагового декодирования РСБКР-кодов // Методы и средства систем обработки информации: сб. науч. ст. / Курск. гос. техн. ун-т. Курск, 1997. С.71-80.

3. Егоров С.И. Расширение возможностей техники вылавливания ошибок для декодирования кодов Рида-Соломона // Телекоммуникации. 2006. №12. С. 21-26.

4. Егоров, С.И., Сошников В.Е. Пошаговый декодер выколотых кодов Рида-Соломона для гибридных FEC + ARQ систем защиты от ошибок, использующий исключение выколотых символов // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: матер. 9-й Междунар. науч.-техн. конф. Рязань: Ряз. обл. ин-т развития образования, 2000. С. 109-111.

5. Пат. 2314639 РФ, МПК[7] H 03 M 13/00. Устройство декодирования кодов Рида-Соломона / Егоров С.И. (Россия). №2006110814/09; заявл. 03.04.2006; опубл. 10.01.2008, Бюл. № 1, 20 с.

Получено 08.02.11

S.I. Egorov, Doctor of Sciences, Professor of Computer Technique Chair, SWSU
(e-mail: sie58@mail.ru)

ON-THE-FLY DECODING FOR PUNCTURED REED-SOLOMON CODES

An on-the fly decoding procedure for punctured Reed-Solomon codes is proposed. This procedure is designed for hybrid FEC+ARQ systems of telecommunication channels. The punctured symbols of a codeword are reconstructed on the beginning steps of the procedure. Also a simple and fast Reed-Solomon decoder based on the proposed procedure is presented.

Keywords: *punctured Reed-Solomon codes, on-the-fly decoding, decoder.*

УДК 004.272.45

С.В.Волобуев, младший научный сотрудник, ФГУП «Курский НИИ» МО РФ
(e-mail: magehunter@rambler.ru)

И.В.Зотов, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники, ЮЗГУ
(e-mail: zotovigor@yandex.ru)

ОРГАНИЗАЦИЯ БАРЬЕРНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ В СТАНДАРТЕ MPI С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСПРЕДЕЛЕННОГО МНОГОСЛОЙНОГО ПАРАЛЛЕЛЬНО-КОНВЕЙЕРНОГО СИНХРОНИЗАТОРА

Рассмотрены особенности организации барьерной синхронизации в многопроцессорных вычислительных системах с передачей сообщений в соответствии со стандартом параллельного программирования MPI. Сформулированы требования к аппаратно-ориентированным средствам барьерной синхронизации в части поддержки интерфейса MPI. На примере разработанного авторами распределенного многослойного параллельно-конвейерного барьерного синхронизатора представлен один из вариантов реализации предъявляемых требований.

Ключевые слова: *барьерная синхронизация, параллельно-конвейерный барьерный синхронизатор, MPI, многопроцессорные системы.*

***

Введение. Барьерная синхронизация является одной из стандартных форм координационных взаимодействий, выполняемых коллективом процессоров в ходе функционирования многопроцессорных вычислительных систем (МВС). Задачей барьерной синхронизации является согласование моментов завершения и запуска групп процессов в определенной точке параллельной программы, именуемой барьером. Реализация процедуры барьерной синхронизации в многопроцессорных системах с распределенной памятью организуется с помощью служебных сообщений, передаваемых через коммуникационную сеть. Время подобной синхронизации может занимать значительную часть от общего времени выполнения параллельной программы. Введение аппаратной обработки служебных сообщений на уровне коммуникационных устройств [1-3] позволяет уменьшить временные задержки барьерной синхронизации. Однако большое число служебных сообщений значительно снижает пропускную способность коммуникационной сети. Кроме этого, время начальной инициализации взаимодействия, а также зависимость времени синхронизации от текущей загрузки сети передачи данных не позволяют добиться значительного сокращения времени координации.

Более перспективным решением является создание независимых от существующей коммуникационной сети барьерных процессоров или координирующих сред [4-6]. Однако при этом встает вопрос о поддержке аппаратными средствами барьерной синхронизации существующих интерфейсов программного обеспечения и, как следствие, огромного объема уже существующих параллельных программ. Для МВС с передачей сообщений наиболее распространенным стандартом параллельного программирования является MPI (Message Passing Interface) [7].

В данной работе описывается процесс барьерной синхронизации в стандарте программирования MPI, и формулируются основные требования, которым должны соответствовать аппаратные средства синхронизации для их совместимости со стандартом. Один из возможных путей реализации предъявляемых требований представлен на примере разработанного авторами распределенного многослойного параллельно-конвейерного барьерного синхронизатора [8].

Барьерная синхронизация в стандарте MPI. Согласно стандарту параллельного программирования MPI взаимодействие группы параллельных процессов (как правило, каждый процесс выполняется на отдельном процессоре) осуществляется посредством передачи сообщений внутри так называемого коммуникатора. Коммуникатор представляет собой виртуальную область связи с уникальным идентификатором, внутри которой осуществляются все коммуникационные взаимодействия. По умолчанию в системе существует один глобальный коммуникатор (MPI_COMM_WORLD), инициализирующийся функцией MPI_Init и объединяющий все процессы. Однако во время функционирования МВС возможно создание/удаление дополнительных коммуникаторов с произвольным объединением взаимодействующих процессов с помощью функций MPI_Comm_create (создание нового коммуникатора), MPI_Comm_dup (дублирование существующего коммуникатора), MPI_Comm_split (расщепление коммуникатора), MPI_Comm_free (удаление коммуникатора). При этом один и тот же процесс может входить в несколько различных коммуникаторов.

Барьерная синхронизация внутри одной группы процессов осуществляется с помощью функции MPI_Barrier. Достигнув точки синхронизации (барьера) в параллельной программе, процесс вызывает функцию MPI_Barrier, которая блокирует работу вызывающего процесса до тех пор, пока остальные процессы, входящие в коммуникатор, также не осуществят ее вызов. После этого блокировка снимается, и происходит дальнейшее выполнение программы. Согласно MPI участниками барьерной синхронизации являются все процессоры, входящие в коммуникатор. Т.е. группа синхронизируемых процессов совпадает с группой процессов, запускаемых по достижении барьера.

С учетом вышесказанного, при реализации барьерной синхронизации в рамках стандарта программирования MPI аппаратная подсистема синхронизации должна обеспечивать:

– поддержку динамического создания и удаления коммуникаторов;

– синхронизацию процессов в пространстве одного коммуникатора;

– независимую синхронизацию групп процессов, относящихся к различным коммуникаторам;

– возможность синхронизации произвольно размещенных среди модулей МВС процессов.

Параллельно-конвейерный барьерный синхронизатор, совместимый со стандартом MPI. Рассмотрим один из возможных вариантов выполнения требований стандарта MPI на примере распределенного многослойного параллельно-конвейерного барьерного синхронизатора [8].

Барьерный синхронизатор состоит из соединенных согласно топологической структуре МВС устройств (модулей), структурно-функциональная схема которых представлена на рисунке 1. Каждому процессорному элементу (ПЭ) ставится в соответствие отдельный модуль, отвечающий за его участие в синхронизации.

В процессе функционирования МВС для каждого создаваемого коммуникатора выделяется совокупность элементов и блоков (одноразрядный слой синхронизации), отвечающих за распространение признаков завершения барьера и запуск процессов. В общем случае количество слоев равно n – максимально возможному числу коммуникаторов. Слои разбиты на p групп по m слоев в каждой. При этом в один момент времени может происходить синхронизация только в двух

соседних группах, остальные находятся в состоянии ожидания. При этом в одной группе происходит опрос ПЭ о выполнении ими участков программы, а в другой – запуск ПЭ, ожидающих завершения барьера. Группы сменяются циклически через определенные промежутки времени.

При использовании разработанного устройства синхронизация процессов внутри одного коммуникатора обеспечивается путем динамического задания битовой маски для каждого процессора, что позволяет установить соответствие между имеющимися в системе коммуникаторами и процессорами, а также за счет формирования признака синхронизации на основании сигналов, полученных только от входящих в коммуникатор процессов. Кроме этого, динамическая установка маски и прохождение сигнала синхронизации через все ПЭ позволяют обеспечить координацию произвольно размещенных в МВС процессов. Поддержка создания/удаления коммуникаторов в ходе выполнения параллельной программы обеспечивается путем выделения/освобождения слоев синхронизации, а независимая координация процессов для различных коммуникаторов выполняется за счет введения параллельных слоев.

Битовая маска хранится в регистре 1 в инверсном виде. Изначально все биты маски равны нулю, что означает, что в системе нет ни одного коммуникатора. Соответственно в регистре 1 установлены единичные значения. При вызове функций MPI_Init, MPI_Comm_create, MPI_Comm_dup, MPI_Comm_split, на вход дешифратора 51 каждого процессора, входящего в новый коммуникатор, подается порядковый номер *i*. Предполагается, что номера коммуникаторов уникальны и возрастают по порядку, новому коммуникатору всегда присваивается минимальный свободный порядковый номер. Дешифратор 51 и группа элементов исключающего ИЛИ 52 обеспечивают инверсию *i*-го бита регистра 1. Единица в *i*-м бите маски означает, что ПЭ входит в *i*-й коммуникатор.

Вызов процессором функции MPI_Barrier, параметром которой является номер коммуникатора *i*, сопровождается подачей значения *i* на вход 31 дешифратора 2 одновременно с единичным сигналом на 32 входе. Единица на *i*-м выходе дешифратора 2 указывает на завершение соответствующим ПЭ участка программы. Кроме этого номер коммуникатора поступает на вход 33 дешифратора 3 параллельно с единичным сигналом по 34 входу. Единичный сигнал на *i*-м выходе дешифратора 3 сигнализирует о необходимости запуска соответствующего ПЭ по достижении барьера.

Формирование сигнала завершения барьера и запуск процессоров осуществляется с помощью группы блоков 17. На вход данных блоков поступают сигналы с регистра 1, дешифраторов 2, 3, а также сигналы завершения синхронизации от соседних ПЭ. На основании данных сигналов комбинационные схемы блоков 17 принимают решения о формировании и передачи признака завершения барьера соседним ПЭ, а также генерации сигнала запуска текущего ПЭ.

При вызове функции MPI_Comm_free осуществляется освобождение слоя, выделенного под соответствующий коммуникатор. Освобождение слоя происходит так же, как и при выделении: путем подачи номера коммуникатора i на вход дешифратора 51 и инверсии i-го бита в регистре 1. В последствии данный слой синхронизации может быть выделен под другой коммуникатор.

Заключение. В данной работе рассмотрен интерфейс стандарта параллельного программирования MPI в части

обеспечения барьерной синхронизации и осуществлен анализ требований, предъявляемых к аппаратным средствам синхронизации. Выявлено, что аппаратные средства должны поддерживать динамическое создание/удаление коммуникаторов и параллельную синхронизацию процессов внутри отдельных коммуникаторов в независимости от размещения процессов среди процессоров системы. Показано, что данные требования реализуются в разработанном авторами параллельно-конвейерном барьерном синхронизаторе.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МД-2218.2011.8.

Список литературы

1. Four-ary tree-based barrier synchronization for 2d meshes without nonmember involvement / S.Moh, C.Yu, B.Lee [et al] // IEEE Trans. Comput. 2001. Vol.50, №8. P. 811-823.

2. Sartori J., Kumar R. Low-overhead, high-speed multi-core barrier synchronization // High Performance Embedded Architectures and Compilers, Lecture Notes in Computer Science, 2010. Vol. №5952. P. 18-34.

3. Scott S.L. Synchronization and Communication in the T3E Multiprocessor // Proc. of the 7th ASPLOS, 1996.

4. Fast synchronization for chip multiprocessors / J.Sampson, R.González, J.-F.Collard [et al] // SIGARCH Computer Architecture News. 2005. Vol.33, №4. P. 64-69.

5. Delgado M., Kofuji S. A distributed barrier synchronization solution in hardware for 2D-mesh multicomputers // Proc. 3rd Intl Conf. High Performance Computing, Dec. 19-22 1996. IEEE: 1996. P. 368-373.

6. Johnson T.A., Hoare R.R. Cyclical cascade chains: a dynamic barrier synchronization mechanism for multiprocessor systems // Proc. IEEE Workshop Mass. Paral. Processing, Intl Paral. Distrib. Processing Symp. (IPDPS-01), San Francisco, 23-27 April 2001. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2001. P. 2061-2068.

7. Букатов А.А., Дацюк В.Н. , Жегуло А.И. Программирование многопроцессорных вычислительных систем. Ростов-н/Д: Изд-во ОО «ЦВВР», 2003. – 208 с.

8. Волобуев С.В., Зотов И.В. Организация параллельно-конвейерной барьерной синхронизации в матричных многопроцессорных системах на основе распределенной координирующей среды // Параллельные вычисления и задачи управления (PACO'08): тр. IV междунар. конф., М., 2008. С. 616–642.

Получено 02.03.11

S.V. Volobuev, Junior Researcher, FSUE «Kursk Research Institute» MD RF, (e-mail: magehunter@rambler.ru)

I.V. Zotov, Doctor of Science, Professor, Computer Science Chair, SWSU (e-mail: zotovigor@yandex.ru)

THE ORGANIZATION OF MPI-TARGETED BARRIER SYNCHRONIZATION USING A DISTRIBUTED MULTISLICE PARALLEL-PIPELINED SYNCHRONIZER

The features of the MPI-targeted barrier synchronization organization in message-passing-based multiprocessor computer systems are considered. The MPI-compatibility requirements to the barrier synchronization hardware are formulated. Using the distributed multislice parallel-pipelined barrier synchronizer proposed by the authors as an example, hardware-level support for the above stated requirements is demonstrated.

***Keywords**: barrier synchronization, parallel-pipelined barrier synchronizer, Message-passing interface (MPI), multiprocessor systems.*

УДК 004.94

Ю.А.Векленко, канд. техн. наук, начальник отдела стендов и технологических средств контроля, ОХП ОКБ «Авиаавтоматика» Курского ОАО «Прибор»
(e-mail: yu.veklenko@gmail.com)

И.В.Зотов, д-р техн. наук, профессор, кафедра вычислительной техники, ЮЗГУ
(e-mail: zotovigor@yandex.ru)

АРХИТЕКТУРА СТЕНДОВО-ИМИТАЦИОННОЙ СРЕДЫ ОТРАБОТКИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОРУЖИЕМ

Рассмотрены назначение, принципы построения, функции и структура стендово-имитационной среды комплексов бортового оборудования, разрабатываемой в ОХП ОКБ «Авиаавтоматика» Курского ОАО «Прибор» для отработки систем управления оружием перспективных летательных аппаратов. Сформулированы ключевые требования к подсистемам среды, кратко рассмотрены решаемые ими задачи и показаны направления дальнейшего развития.

Ключевые слова: *летательные аппараты, системы управления оружием, комплекс бортового оборудования, стендово-имитационная среда.*

***

Введение. Обеспечение качества разработки авиационных систем управления оружием (СУО) как части комплекса бортового радиоэлектронного оборудования и внедрение их на борт летательного аппарата невозможно без проведения испытаний (предварительные испытания, межведомственные испытания, государственные испытания). Испытания, как правило, осуществляются с привлечением стендово-имитационной среды (СИС), обеспечивающей возможность отработки и проведения испытаний отдельных частей комплекса бортового оборудования (КБО) ЛА при моделировании остальных подсистем. Стендово-имитационная среда – это распределенная аппаратно-программная среда, построенная на основе современных универсальных вычислительных средств, информационных и сетевых технологий, обеспечивающая реализацию всевозможных динамических режимов моделирования и анализа разных вариантов структурной и функциональной организации КБО (построения различных прототипов КБО) различных ЛА.

Назначение и функции стендово-имитационной среды. СИС предназначена для отработки комплекса архитектурных и алгоритмических решений в области аппаратного и программного обеспечения КБО ЛА, создания единой технологии синтеза КБО в соответствии с требованиями действующих нормативных документов [1]. С ее помощью решаются следующие задачи:

– синтез и отработка перспективных боевых алгоритмов, алгоритмов управления ЛА, алгоритмов, экспертных систем, систем ситуационного управления, групповых действий и других алгоритмов верхнего уровня (ВУ) (с учетом применения новых видов оружия и информационных систем), определяющих уровень «интеллекта» ЛА и являющихся основой для разработки функционального программного обеспечения ядра бортовой цифровой вычислительной системы (БЦВС);

– сравнительная оценка различных вариантов архитектурного построения КБО ЛА на ранних стадиях его проектирования;

– отработка концептуальных особенностей и конкретных технических решений информационно-управляющего поля (ИУП) кабины ЛА;

– отработка архитектуры и структурной организации БЦВС ЛА с учетом входящих в ее состав бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ) и ПО, включая определение требований к техническим характеристикам БЦВМ, про-

пускной способности каналов связи между БЦВМ, датчиками информации и ИУП кабины ЛА;

– отработка перспективных протоколов информационного обмена межсистемных интерфейсов, обеспечивающих взаимодействие между БЦВС, датчиками информации и взаимодействия с ИУП кабины ЛА;

– синтез и отработка операционной системы и функционального программного обеспечения БЦВС;

– обеспечение моделирования режимов работы КБО ЛА в информационных условиях, максимально приближенных к реальным;

– отработка требований тактико-технического задания или технических заданий на ЛА, КБО ЛА или на его отдельные элементы;

– отработка следующих перспективных технологий синтеза КБО, в том числе:

– программирование КБО;

– сквозное проектирование и модернизация КБО;

– отработка, тестирование, верификация и испытания КБО;

– аттестационное тестирование бортовых модулей и элементов КБО;

– подготовка полетного задания;

– генерация трехмерных сцен;

– создание и пополнения фонда алгоритмов и программ.

Принципы построения и структура стендово-имитационной среды. Основополагающими принципами построения СИС являются: открытость и масштабируемость архитектуры, адаптируемость, унифицированность, технологичность. Открытость и масштабируемость обеспечивают, прежде всего, возможность наращивания вычислительного потенциала СИС. Адаптируемость позволяет легко настраивать СИС для решения задач анализа и синтеза того или иного прототипа КБО. Глубокая унификация и стандартизация обеспечивают снижение затрат и сокращение сроков как разработки, так и последующих модернизаций СИС. Высокая технологичность, обеспечиваемая использованием новейших технологий и хорошо отработанных коммерческих компонент (COTS-компонент), гарантирует снижение технического риска при создании СИС и сокращение затрат на ее техническое обслуживание и эксплуатацию.

В состав СИС входят следующие подсистемы:

– подсистема моделирования и имитации (ПМИ) информационного управляющего поля кабины ЛА;

– ПМИ закабинного пространства ЛА;

– ПМИ БЦВС систем верхнего уровня;

– ПМИ информационного канала (ИК) ЛА;

– ПМИ динамики полета ЛА;

– ПМИ внешней обстановки (модели самолетов противника в боевом порядке, их КБО, оружия, наземных и воздушных целей, зенитных комплексов, закабинного пространства);

– подсистема управления моделированием, контроля хода и регистрации результатов моделирования;

– ПМИ оружия и СУО.

Кроме того, в состав СИС входят следующие вспомогательные стенды:

– стенд подготовки полетного задания (ППЗ);

– стенд подготовки трехмерных графических сцен;

– стенд программирования БЦВМ, включая систему автоматизированного проектирования средств информационного обмена БЦВС;

– стенды с информационными моделями датчиков;

– стенды с реальными датчиками;

– распределенный фонд алгоритмов и программ (ФАП).

Состав СИС может изменяться в зависимости от содержания конкретного проекта.

Стенды комплексирования и отработки СУО являются частью СИС, так как решают одну из задач отработки КБО – отработку и проведение испытаний СУО. Подсистемы, входящие в стенд, должны обеспечивать:

– выполнение всех подготовительных работ, необходимых для проведения моделирования;

– управление работой и взаимодействием всех подсистем в процессе проведения моделирования;

– простой и удобный интерфейс руководителя эксперимента;

– управление состоянием эксперимента (конфигурация участвующих в моделировании подсистем, подача команды начала моделирования);

– контроль над процессом моделирования (выбор сценария эксперимента из базы, запуск и останов сценариев экспериментов);

– задание начальных условий эксперимента;

– контроль параметров моделирования в реальном времени;

– возможность изменять условия эксперимента в ходе моделирования;

– осуществлять запуск (рестарт) всех аппаратных платформ компонентов системы моделирования в автоматическом режиме.

Отсутствие комплексного подхода к разработке стендов наземной отработки СУО привело к развитию только части подсистем стенда и недостаточному уровню автоматизации процесса испытаний.

Требования к подсистемам стендово-имитационной среды. Ниже формулируются требования к отсутствующим или слаборазвитым подсистемам стенда, которые необходимы при создании стендов наземной отработки перспективных СУО.

Требования к ПМИ закабинного пространства ЛА.

ПМИ закабинного пространства ЛА должна обеспечивать моделирование и имитацию закабинного пространства (закабинной обстановки, наблюдаемой летчиком через остекление кабины и включающей изображение воздушных и наземных объектов, в том числе самолетов боевого порядка, естественных препятствий, фона неба, подстилающей поверхности), необходимого для функциональной отработки режимов применения ЛА, выполняемых в пределах прямой видимости наземных и воздушных объектов. Устройство отображения визуальной информации должно обеспечивать сектор закабинного пространства не менее 25° по вертикали и 110° по горизонтали.

Требования к ПМИ информационных каналов КБО ЛА.

В ПМИ информационных каналов КБО ЛА должна быть обеспечена пространственно-временная синхронизация всех ИК. Модели ИК должны строиться по функционально-блочному принципу и соответствовать требованиям технических заданий на реальные подсистемы. Модели ИК должны содержать блоки имитации помех, в которых должны воспроизводиться характерные ошибки сигналов. ПМИ имитации информационных каналов КБО ЛА должна включать математические модели радиолокационного канала, информационного оптического канала режима «воздух-воздух» («В-В»), оптико-телевизионных каналов и канала радиотехнической разведки. В состав ПМИ должны входить также исполнительные каналы, представленные математическими моделями каналов радиоэлектронного противодействия (РЭП), опти-

ко-электронного противодействия (ОЭП) и связи с СУО.

Требования к ПМИ динамики полета ЛА.

ПМИ динамики полета ЛА должна обеспечивать возможность моделирования любых маневров самолета, используемых на всех этапах применения (маршрут, выход в информационный контакт, дальний бой с воздушной целью, дальний бой с наземной целью, ближний бой с воздушной целью, ближний бой с наземной целью).

Требования к ПМИ внешней обстановки.

Подсистема моделирования внешней обстановки должна обеспечивать два основных режима: режим «воздух- воздух» («В-В») и режим «воздух-поверхность» («В-П»).

Требования к ПМИ оружия.

При формировании требований к подсистеме моделирования и имитации оружия должны анализироваться математические модели ракеты класса «В-В» и авиационных средств поражения класса «В-П» на уровне динамических эквивалентов, ориентированных на конкретный набор условий применения и подробные математические модели, воспроизводящие практически произвольные условия применения.

Требования к подсистеме управления моделированием, контроля хода и регистрации результатов моделирования.

Данная подсистема должна обеспечивать:

– выполнение всех подготовительных работ, необходимых для проведения моделирования (конфигурирование поверхности в части определения объектового состава трехмерной сцены, параметров метеоусловий, разработка тактической обстановки; конфигурирование боевой нагрузки самолета и т. п.);

– управление работой и взаимодействием всех подсистем СИС в процессе проведения моделирования, контроль работы подсистем СИС в ходе моделирования и регистрацию результатов моделирования;

– простой и удобный интерфейс руководителя эксперимента с СИС;

– управление состоянием эксперимента (конфигурация участвующих в моделировании подсистем, подача команды начала моделирования);

– контроль над процессом моделирования (выбор сценария эксперимента из базы, запуск и останов сценариев экспериментов);

– задание начальных условий эксперимента (расположение и состав участников, погодные условия и т.п.);

– контроль параметров моделирования в реальном времени;

– возможность изменять условия эксперимента в ходе моделирования (добавлять/убирать цели «противников», «союзников», принудительно изменять их состояние и пространственное положение и т.д.);

– запуск всех аппаратных платформ компонентов системы моделирования в автоматическом режиме.

Подсистема управления должна обеспечивать возможность включения в состав стенда независимо разработанных моделей, написанных, в общем случае, на разных языках программирования и даже для разных операционных систем, реальных модулей бортового оборудования, а также для обеспечения возможности подключения удаленных моделей и аппаратуры на различных стендах. Подсистема должна содержать в своем составе средства контроля, обеспечивающие проведение диагностики составляющих частей

стенда непосредственно в ходе моделирования, оперативное выявление отказов и случаев некорректной работы как аппаратурных, так и программных модулей стенда.

В состав средств контроля должны входить:

– средства контроля состояния аппаратурных вычислительных средств подсистем стенда;

– средства контроля каналов связи, включая каналы связи с удаленными стендами;

– средства контроля состояния и функционирования системного программного обеспечения стенда в целом;

– система контроля состояния комплекса математических моделей.

Подсистема должна обеспечивать регистрацию и анализ параметров, как по ходу проведения эксперимента, так и после его окончания, т.е. по информации, записанной на диски в течение эксперимента. Она также должна обеспечивать режим повторного воспроизведения (проигрывания) проведенного эксперимента по записанной информации без вмешательства оператора.

Требования к математическим моделям.

Математические модели подсистем КБО должны обеспечивать реализацию алгоритмов их использования, а также управления на исследуемых режимах работы. Они должны представляться разработчиками упомянутых подсистем, создаваться по заданию разработчиков с последующим согласованием с ними либо создаваться в соответствии с ТЗ на разработку предполагаемого устройства (подсистемы), если такого к моменту постановки экспериментальных исследований не разработано.

Математическая модель виртуального пространства подсистем КБО, в котором осуществляется моделирование, должна обеспечивать адекватное описание метеорологических условий в районе моделируемых полетов (направление ветра, его скорость, турбулентность, облачность) в пределах, необходимых для выполнения задач, поставленных в эксперименте, рельефа поверхности земли в соответствии с потребностями экспериментальных исследований на основе электронных карт, навигационно-тактической обстановки наземной поверхности моделируемого пространства в соответствии с решаемыми задачами, наличие и движение объектов в пространстве в соответствии с решаемыми задачами. Степень адекватности модели подсистем КБО объекту моделирования должна определяться целью моделирования: минимальные требования для поискового моделирования, максимальные – для отладочного моделирования.

Математические модели, включаемые в состав математического обеспечения стенда, должны быть документированы с использованием единых технологических средств разработки ПО.

Математическая модель радиолокационного канала должна обеспечивать выполнение функций активного поиска, обнаружения, сопровождения, распознавания типа целей, информационного обеспечения применения оружия, картографирования, коррекции навигационной системы и предупреждения о возможности столкновения с препятствиями.

Математическая модель информационного оптического канала режима «В-В» должна обеспечивать возможность применения оружия, пуска ракет «В-В» с инфракрасной головкой самонаведения в условиях интенсивного помехового РЭП.

Математическая модель оптико-телевизионного канала предназначена для имитации работы КБО в режиме «В-П»

при отработке алгоритмов применения оружия в реальном масштабе времени.

Математическая модель каналов связи с СУО должна реализовать логику формирования признаков, обеспечивающих обмен по линиям сопряжения между СУО и БЦВС, СУО и ИУП, СУО и ракет в соответствии с реальными протоколами обмена между этими системами [2].

Математическая модель ракеты класса «В-В» должна состоять из трех основных моделей:

– ракеты как ЛА;

– инерциальной системы управления или эквивалентных по своему назначению автопилота и вычислителя, реализующего фильтрацию и закон управления;

– головки самонаведения.

Математическая модель авиационных средств поражения класса «В-П» должна содержать модели неуправляемых авиационных средств поражения, управляемых авиационных бомб калибра 500 и 1500 кг, многоцелевой ракеты малой дальности, многоцелевой ракеты большой дальности с командно-телевизионной системой наведения, противолокационной ракеты прорыва противовоздушной обороны (ПВО), легкой скоростной противолокационной ракеты малой дальности, противокорабельной ракеты.

Требования к подсистемам поддержки стенда.

Эффективное применение стенда предполагает использование определенных подсистем поддержки. К их числу, в первую очередь, следует отнести:

– подсистему программирования БЦВМ;

– оборудование тестирования и аттестации бортовых модулей;

– оборудование с информационными моделями датчиков;

– оборудование с реальными датчиками;

– распределенный фонд алгоритмов и программ.

Подсистема программирования БЦВМ предназначена для разработки и первичной отработки ПО БЦВМ и БЦВС авиационного комплекса и должна поддерживать внедрение современной технологии программирования БЦВС (на основе автоматизированной поддержки процессов создания и сопровождения ПО) для авиационного комплекса при его моделировании и отработке на стенде и обеспечивать:

– высокую производительность труда программистов;

– поддержание форм организации труда коллектива, обеспечивающих планирование, управление и контроль работ, их распараллеливание и улучшение взаимодействия в коллективе между отдельными программистами и их группами;

– предоставление формализованных средств реализации программного продукта с заданными характеристиками качества (декомпозиция и спецификация создаваемых компонент программного продукта и компоновка программного комплекса в целом, их верификация, тестирование и оптимизация, отладка и устранение ошибок на как можно более ранних этапах реализации);

– упрощение процесса модификации программного продукта;

– отчуждаемость программного продукта от его разработчика;

– мобильность создаваемого программного продукта;

– взаимодействие инструментов разработки программ между собой по информационным связям в целях поддержки полного информационного окружения;

– организацию управления инструментами разработки в целях строгого со-

блюдения технологии разработки бортовых программ;

– невозможность некорректного использования инструмента на конкретном этапе разработки программ;

– управление потоками данных между инструментами с контролем того, какая информация поступает от того или иного инструмента и кому она предназначается;

– организацию хранения всех данных по единой форме и быстрый доступ инструментов к необходимой им информации;

– невозможность несанкционированного доступа к данным как внутри стенда, так и извне;

– взаимодействие с пользователем через унифицированный интерфейс, не допускающий некорректных действий со стороны пользователя;

– сбор статистической информации по разработке программ с последующей выдачей отчетной документации.

Исходя из назначения подсистемы, она должна поддерживать как процессы планирования разработки программ, так и процессы разработки, такие как определение требований к ПО, проектирование, кодирование и интеграция программ, интегральные процессы, включающие процесс верификации ПО, процесс управления конфигурацией ПО, процесс обеспечения качества программ и процесс их сертификации, а также технологию сквозного проектирования систем информационного обмена в КБО, обеспечивающую автоматизацию процесса комплексирования БЦВС [3].

Оборудование аттестационного тестирования предназначено для тестирования блоков СУО. Тестирование блоков должно быть выполнено на следующих этапах:

– автономное тестирование достоверности функционирования макетных и опытных образцов модулей на этапе их разработки;

– автономное тестирование блоков СУО на этапе их производственной реализации;

– тестирование блоков СУО на этапе их системной интеграции;

– тестирование блоков СУО на этапе полунатурного моделирования.

Целью аттестационного тестирования является определение соответствия конкретной технической реализации модуля выбранным спецификациям.

К оборудованию с информационными моделями датчиков предъявляются следующие требования:

– возможность имитации работы реальных датчиков;

– возможность информационного взаимодействия подсистем стенда с моделями реальных датчиков.

Для сбора и хранения компонент многократного использования необходимо создать распределенный ФАП объектов авиационной техники. Он должен комплектоваться алгоритмами и программами (программными средствами, компонентами многократного использования) по следующим тематическим направлениям:

– системы отображения информации и органов управления;

– системы объективного контроля;

– системы управления оружием;

– математические модели;

– операционные системы БЦВМ и БЦВС;

– автоматизированные системы управления КБО;

– библиотеки стандартных программ;

– системы автоматизации программирования, отладки и документирования.

Система защиты информации в стенде должна обеспечивать сохранность следующих информационных объектов:

– параметров моделируемых систем;

– алгоритмов функционирования;

– программной реализации моделей отдельных систем и комплексов;

– методик и сценариев проведения моделирования, результатов моделирования и оценок эффективности.

Система защиты информации должна гарантировать сохранность указанных информационных объектов, т.е. обеспечить защиту от сбоев, ведущих к потере информации, а также неавторизованного создания, уничтожения или искажения данных, конфиденциальность информации, т.е. невозможность участия в моделировании или анализе его результатов неавторизованных пользователей. Указанная выше система должна обеспечивать многоуровневую схему авторизации, разделение пользователей на группы с различными правами доступа в зависимости от рода их деятельности и достигнутыми в текущий момент договоренностями между фирмами - участниками.

Заключение. При планировании наземной отработки СУО используются имитационные модели, позволяющие оценить объемы проведения испытаний и их поэтапное распределение. Модели основаны на исследовании структуры отработочных испытаний, характеристик процесса отработки и прогнозирования эксперимента. Только систематическое внедрение вышеперечисленных требований позволит автоматизировать процесс контроля СУО и повысить качество, исключив человеческий фактор при проведении испытаний.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МД-2218.2011.8.

Список литературы

1. Позняков П.В., Перов О.Л., Тарханов И.Б. Полунатурное моделирование в технологии создания авиационных комплексов истребительной авиации // Авиационные системы в XXI веке: матер. Юбилейной науч.-техн. конф. М: НИЦ ГосНИИАС, 2006, Т.1. С. 59-64.

2. Состояние и перспективы развития оружия класса «воздух-воздух» для самолётов 5-го поколения: аналитический обзор по материалам зарубежной информации / под общей ред. Е.А. Федосова; сост.: А.Н. Давыдов, Л.Г. Черных, О.Н. Панкратов, В.А. Чабанов. М.: Изд. НИЦ ГосНИИАС, 2004.

3. Векленко Ю.А., Борейкин А.С. СК-35 – новое поколение стендов отработки СУО // Перспективы развития систем управления оружием: матер. 4 науч.-практ. конф. М: Издательская группа «Бедретдинов и Ко», 2007. С.51-55.

Получено 27.02.11

YU.A.Veklenko, Candidate of Sciences, Head Of Testbed and Technological Control Means Department, «Aviaavtomatika» Development Labs, Kursk Joint-Stock Company «Pribor» (e-mail: yu.veklenko@gmail.com)

I.V.Zotov, Doctor of Sciences, Professor, Computer Science Chair, SWSU (e-mail: zotovigor@yandex.ru)

A SIMULATION TESTBED ENVIRONMENT FRAMEWORK FOR THE VERIFICATION OF FUTURE-TECHNOLOGY AIRBORNE WEAPON CONTROL SYSTEMS

The construction principles, functions, and structure of a simulation testbed environment framework for the verification of future-technology airborne weapon control systems are under consideration, which is manufactured by the «Aviaavtomatika» development labs. at Kursk joint-stock company «Pribor». The key requirements to the environment subsystems are formulated, the tasks solved by the environment and its future development directions are stated.

***Keywords**: aircraft, airborne weapon control systems, on-board hardware, simulation testbed environment.*

УДК 621.391.25

Ю.С. Бехтин, д-р техн. наук, профессор, кафедра автоматики и информационных технологий, Рязанский государственный радиотехнический университет (e-mail: yuri.bekhtin@yandex.ru)

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ЗАШУМЛЕННЫХ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОИСКОМ КОГЕРЕНТНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Предлагается новый метод комплексирования зашумленных мультиспектральных изображений, основанный на поиске их когерентных структур с помощью вейвлет-преобразования. Результирующее изображение высокого качества формируется итеративно как сумма наилучших нелинейных аппроксимаций входных изображений, полученных после извлечения когерентных структур путем адаптивной пороговой обработки вейвлет-коэффициентов. Результаты моделирования показали преимущество предлагаемого метода по сравнению с известными подходами по критериям PSNR (ПОСШ) и SIMM.

Ключевые слова: *комплексирование на основе вейвлет-преобразования, зашумленные мультиспектральные изображения, поиск когерентных структур.*

***

1. Введение

При комплексировании несколько изображений с низким разрешением и/или различными спектральными характеристиками объединяются с целью получения одного изображения высокого разрешения. Известные методы комплексирования изображений, работающие на уровне пикселей, варьируются от относительно простых, например усреднение изображений, до относительно сложных, например с использованием анализа главных компонент, пирамидального и вейвлет-преобразования [1]. В последнее время вейвлет-преобразование стало одним из самых популярных методов комплексирования при обработке данных видеокамер, снимков дистанционного зондирования Земли, медицинских изображений. Кроме того, на нем разработаны стандартные модули специализированных программ по обработке изображений, например, ENVI, PCI, ERDAS. Практически во всех известных методах, использующих вейвлеты, на основе некоторого правила (алгоритма) комбинируются вейвлет-коэффициенты двух или более исходных изображений.

Для вейвлет-декомпозиции исходных изображений могут использоваться различные типы вейвлет-преобразования [1, 2], например быстрое вейвлет-преобразование (FWT), комплексное вейвлет-преобразование двойного дерева (DT-CWT). Затем вейвлет-коэффициенты комбинируются на основе т.н. «правила отбора максимума» (*maximum-selection fusion rule*), чтобы сформировать набор вейвлет-коэффициентов, соответствующих комплексированному изображению. Правило отбора максимума заключается в сравнении по абсолютной величине соответствующих вейвлет-коэффициентов всех исходных изображений, после чего с помощью обратного вейвлет-преобразования над наибольшими по амплитуде вейвлет-коэффициентами формируется результирующее изображение.

Поскольку характерным для вейвлетов является выделение существенных особенностей изображения, данное правило и более сложные схемы, как например [3], хорошо работают с относительно качественными (слабо искаженными) изображениями. Тем не менее, многие современные видеодатчики и приборы регистрации видеоданных могут дополнительно вносить в изображения специфические шумы, например геометрический шум в инфракрасных устройствах, спекл-шум в радарах с синтезированной апертурой и т.п. В случае зашумленных изображений методы комплексирования изображений должны включать дополнительные средства фильтрации. Известно несколько работ, посвященных комплек-

сированию зашумленных изображений, например [4]. Очевидно, методы комплексирования зашумленных изображений, базирующиеся на вейвлет-преобразовании, могут быть эффективнее использующихся методов с точки зрения устранения шумов и цветовых искажений. Основная проблема здесь состоит в том, чтобы задавать оптимальные в некотором смысле значения параметров методов и алгоритмов комплексирования (таких как пороги), что сегодня возлагается на пользователя.

Целью данной работы является разработка полностью автоматического метода комплексирования, в котором вместо «правила отбора максимума» используется отбор таких когерентных структур зашумленных изображений, когда достигается максимальная корреляция между нелинейной аппроксимацией некоторого зашумленного изображения и выбранным вейвлет-базисом [5]. Метод выделения когерентных структур, как показано в [6], использующий библиотеку локальных тригонометрических базисов и вейвлет-пакетное преобразование, успешно применяется для восстановления поврежденных музыкальных аудиозаписей. В работе данный метод модифицируется для комплексирования 2D сигналов (изображений), где зашумленные изображения формируют библиотеку (вместо библиотеки базисов), а оценка коэффициента корреляции вычисляется только для одного вейвлет-базиса, выбранного пользователем. Чтобы избежать появления артефактов в результирующем изображении, в работе используется инвариантное к сдвигу дискретное вейвлет-преобразование (SI-DWT) [7].

2. Когерентные структуры и шум

Пусть Y=X+Z является зашумленным изображением оригинала X, состоящим из I пикселей, которые подвергаются вейвлет-преобразованию на несколько уровней с выбранным вейвлет-базисом. Шум Z с дисперсией σ_Z^2 в наблюдаемом изображении Y представляется вейвлет-коэффициентами w_{ξ_k}, k=1, ... I, которые слабо коррелированны с вейвлет-базисом. Если число пикселей I относительно велико, то для любого ортонормированного вейвлет-базиса существует вероятность, стремящаяся к 1, такая что [5]

$$\frac{\max_{1\le k\le I}\left|w_{\xi_k}\right|}{\|Z\|} \le \frac{\sqrt{2\ln I}\sigma_Z}{\sqrt{I}\sigma_Z} = \frac{\sqrt{2\ln I}}{\sqrt{I}} = \rho_I . \quad (1)$$

В соотношении (1) подразумевается, что Z является нормальным (гауссовским) процессом (белый шум) с нулевым средним. Параметр ρ_I может считаться верхней оценкой коэффициента корреляции между гауссовским шумом и любым выбранным вейвлет-базисом, и, как видно из (1), эта оценка не зависит от дисперсии шума. Автором было экспериментально доказано [9], что теоретическое значение ρ_I также является верхней асимптотой для коэффициентов корреляции между вейвлетами Добеши, симлетами, некоторыми биортогональными вейвлетами и шумами с различными законами распределения и их комбинациями, например логнормальное, экспоненциальное, гамма- распределения и т.п.

С другой стороны, также существует возможность вычислить коэффициент корреляции между исходным изображением и выбранным вейвлет-базисом, используя вейвлет-коэффициенты w_{Y_i}, $1 \le i \le I$, наблюдаемого изображения Y:

$$\rho(Y) = \frac{\sup_{1\le i\le I}\left|w_{Y_i}\right|}{\|Y\|}. \quad (2)$$

Коэффициент корреляции вида (2) вычисляется на основе данных всего зашумленного изображения, что может по-

мочь только в выборе наилучшего вейвлет-базиса из библиотеки базисов. Для того чтобы извлекать информативные компоненты из зашумленного изображения, необходимо использовать более гибкую схему. Из теории вейвлет-преобразования [8] известно, что нелинейная аппроксимация любого сигнала, декомпозированного с помощью заданного вейвлет-базиса, может быть восстановлена через обратное вейвлет-преобразование W^{-1} по M первым (значимым) вейвлет-коэффициентам наибольшей амплитуды после их сортировки:

$$\hat{X} = \sum_{k=1}^{M} W^{-1}\left\{w_{Y_k}\right\}. \qquad (3)$$

где

$$\left|w_{Y_k}\right| \geq \left|w_{Y_{k+1}}\right|, \ \forall k \in [1,...,I]. \qquad (4)$$

Таким образом, когерентная структура исходного изображения определяется согласно [5]:

$$\rho(Y_k) = \frac{\left|w_{Y_k}\right|}{\left\|Y\right\|} > \rho_I \quad 1 \leq k \leq M. \qquad (5)$$

При любом значении M остаток Y_M может быть вычислен как разность между входным изображением и псевдоизображением, полученным после обратного вейвлет-преобразования над когерентными структурами:

$$Y_M = Y - \sum_{k=1}^{M} W^{-1}\left\{w_{Y_k}\right\} = \sum_{k=M+1}^{I} W^{-1}\left\{w_{Y_k}\right\}. \qquad (6)$$

Остаток Y_M не может быть признан шумом, если выполняется следующее неравенство:

$$\rho^2(Y_M) = \frac{\left|w_{Y_M}\right|^2}{\sum_{k=M+1}^{I}\left|w_{Y_k}\right|^2} > \rho_{I-M}^2. \qquad (7)$$

Оценка $\hat{X}$ оригинального изображения является суммой M когерентных структур вида (3). Таким образом, поиск когерентных структур выглядит похожим на грубую пороговую обработку вейвлет-коэффициентов с величиной порога [5]:

$$\tau = \rho_{I-M}\sqrt{\sum_{k=M+1}^{I}\left|w_{Y_k}\right|^2}. \qquad (8)$$

3. Предлагаемый метод комплексирования

Пусть имеется L зашумленных изображений одной и той же сцены, которые получены видеодатчиками в разных спектральных диапазонах и которые формируют библиотеку исходных изображений $\Lambda=\{Y^1, Y^2, \ldots, Y^L\}$. Чтобы снизить вычислительные затраты, каждое изображение декомпозируется с помощью единственного вейвлет-базиса, выбранного конечным пользователем из имеющейся у него библиотеки вейвлет-базисов. Выбор подходящего вейвлет-базиса может быть сделан посредством различных функций стоимости, например, используя оценку $\rho(Y^\iota)$, ι=1,…,L, вида (2) коэффициента корреляции между входным изображением Y^ι, ι=1,…,L, и любым вейвлет-базисом из библиотеки базисов. Поскольку входные изображения содержат одну и ту же сцену, то один и тот же вейвлет-базис может быть выбран для нескольких изображений. Такая ситуация происходит, если количество изображений в библиотеке Λ относительно небольшое, например L=2, 3, и/или изображения получены видеодатчиками, работающими в соседних участках спектра. Как показало компьютерное моделирование, извлечение когерентных структур в таких случаях остается стабильным.

Исходные изображения имеют низкие разрешения из-за воздействия шумов видеодатчиков и внешних помех. Когда статистические свойства искажающих воздействий неизвестны, то поиск когерентных структур может рассматриваться как адаптивная пороговая обработка вейвлет-коэффициентов с изменяющейся

величиной порога (8). Основная идея предлагаемого метода комплексирования заключается в том, чтобы выделять и сохранять те когерентные структуры изображений, которые являются наилучшими в смысле некоторого критерия, а результат комплексирования представлять в виде суммы сохраненных когерентных структур вида (3).

Наилучшей когерентной структурой с номером α во всех исходных изображениях библиотеки считается такая, которая минимизирует функцию стоимости:

$$C(Y^{\alpha})=\min_{\iota} C(Y^{\iota}),\quad \iota=1,\ldots,L, \qquad (9)$$

где $$C(Y^{\iota})=\sum_{i=1}^{I}\Phi\left(\frac{\left|w_{Y_i}^{(\iota)}\right|^2}{\left\|Y^{\iota}\right\|^2}\right). \qquad (10)$$

Как видно из (9), выбор наилучшей когерентной структуры зависит от вида вогнутой функции Шура Ф. В работе используется энтропия вида:

$$\Phi(u) = -u\ln u,\ u \ge 0. \qquad (11)$$

4. Алгоритм комплексирования

В известных схемах комплексирования при анализе зашумленных изображений нельзя достаточно точно определить, какое из изображений (или его компоненты) является доминирующим. Предлагаемый алгоритм комплексирования может быть итеративно применен ко всем изображениям из библиотеки, если на следующей итерации снова анализировать остатки, то есть положить $Y_M = Y$. Таким образом, результирующее изображение последовательно корректируется, поскольку наилучшая когерентная структура может быть извлечена из любого остатка среди имеющихся остатков на текущей итерации.

Предлагаемый алгоритм комплексирования состоит из следующих шагов.

1. Формируется библиотека мультиспектральных изображений, где все или некоторые из них искажены специфическими шумами видеодатчиков.

2. Конечным пользователем для каждого изображения выбирается наилучший вейвлет-базис по некоторому критерию.

3. Производится присвоение $Y^{\iota}_{M} = Y^{\iota}$, ι=1,…,L.

4. Выполняется вейвлет-преобразование вида SI-DWT для каждого изображения из библиотеки с соответствующим вейвлет-базисом и сохранением массива вейвлет-коэффициентов.

5. Производится сортировка вейвлет-коэффициентов в соответствии с (4).

6. Осуществляется поиск когерентных структур изображений, используя условие (7), и находится число значимых вейвлет-коэффициентов M.

7. Выполняется восстановление нелинейных аппроксимаций $\hat{X}$ и остатков Y^{ι}_{M} с помощью обратного вейвлет-преобразования.

8. Вычисляется значение функции стоимости (10), затем, используя правило (9), выбирается наилучшая когерентная структура $\hat{X}^{\alpha}$ из всех сохраненных когерентных структур, соответствующих изображениям из библиотеки.

9. Корректируется сохраненное изображение, полученное на предыдущей итерации, с новой нелинейной аппроксимацией $\hat{X}^{\alpha}$.

10. Если M=0, то производится останов алгоритма, результирующее комплексированное изображение как кумулятивная сумма остатков уже находится в оперативной памяти и может быть сохранено в другом месте и/или в другом формате, а также отображено на дисплее; в противном случае осуществляется переход к шагу 3.

Необходимо отметить, что применение на первой итерации величины порога, вычисленного по соотношению (8), приводит к сильному сглаживанию, в ре-

зультате чего в остатки переходит относительно большое число информативных составляющих изображений, часть которых не будет обнаружена на последующих итерациях из-за низкого отношения сигнал-шум. Таким образом, качество комплексированного изображения окажется не высоким, поскольку может быть сформировано из тех остатков, где выделенные когерентные структуры соответствуют особенностям шума, а не полезного сигнала. Чтобы уменьшить число подобных ситуаций, предлагается использовать следующую модификацию вышеприведенного алгоритма. На шаге 6 поиск когерентных структур на первой итерации осуществляется с величиной порога на 20 % меньше расчетного (теоретического), полученного по соотношению (8). На последующих итерациях производится увеличение порога (8) с некоторым приращением до тех пор, пока не будет достигнуто его теоретическое значение (8). Такая модификация приводит к тому, что на первых итерациях в остатках наблюдается больше шумовых искажений по сравнению с использованием порога (8), но выбор наилучших когерентных структур на шаге 8 алгоритма частично компенсирует искажения, а добавление «чистых» когерентных структур на последующих итерациях увеличивает отношение сигнал-шум.

5. Результаты моделирования

К настоящему моменту собрано большое количество результатов статистического моделирования на ЭВМ, которые доказывают эффективность предложенного метода комплексирования. При имитационном моделировании использовались изображения, полученные от видеокамер, радаров с синтезированной аппретурой, инфракрасных сканирующих устройств. Кроме того, в экспериментах участвовали изображения, сформированные с помощью видеодатчиков, работающих в соседних неперекрывающихся полосах частот. Во всех случаях наблюдается значительное улучшение качества комплексированного изображения по сравнению с изображениями, полученными после предварительной фильтрации и с применением известных схем комплексирования.

Ниже приводятся результаты компьютерного моделирования для фрагмента хорошо известного изображения земной поверхности, полученного спутником GeoEye с разрешением 1,65 м, которое взято из библиотеки изображений Matlab (рис.1). Два зашумленных изображения, приведенных на рис.2 и рис.3, были смоделированы добавлением случайных чисел с гауссовским и экспоненциальным распределениями. В качестве вейвлет-базисов для изображений, показанных на рис.2 и рис.3, использовались вейвлеты db7 и db9 соответственно. Преобразование SI-DWT выполнялось для трех уровней декомпозиции. Обработанное изображение, полученное с помощью предлагаемого метода, показано на рис.6.

Для сравнения на рис.4 и рис.5 представлены изображения, полученные с помощью усреднения зашумленных изображений и применением вышеописанной схемы комплексирования, использующей «правило отбора максимума». Численные результаты для пикового отношения сигнал-шум (ПОСШ) и комплексной оценки структурного сходства SSIM (Structural SIMilarity) приведены в табл.1. Как видно из табл.1 и рис.1-6, предлагаемый алгоритм обеспечивает лучшее качество обработки как визуально, так и численно по критериям ПОСШ и SSIM.

Результаты моделирования, иллюстрирующие, какие изображения были выбраны алгоритмом в процессе поиска когерентных структур, представлены в табл.2. Как видно из табл.2, «переключение» между изображениями относительно интенсивное даже в случае двух изображений в библиотеке.

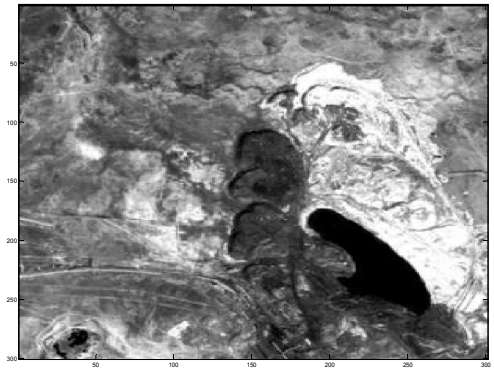


Рис.1. Оригинальное изображение

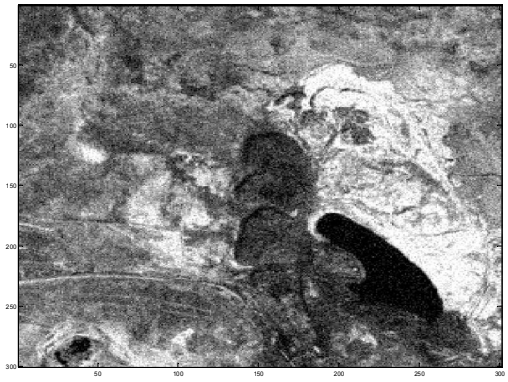


Рис.2. Исходное изображение (Nr1), искаженное аддитивным гауссовским шумом, σ_z^2=34

Рис.3. Исходное изображение (Nr2), искаженное аддитивным экспоненциальным шумом, σ_z^2=56

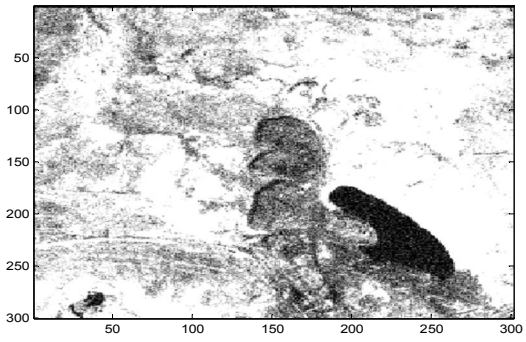


Рис.4. Комплексированное изображение, полученное усреднением

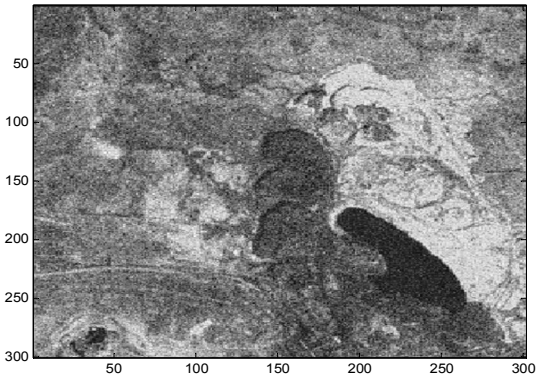


Рис.5. Комплексированное изображение, полученное по «правилу отбора максимума»

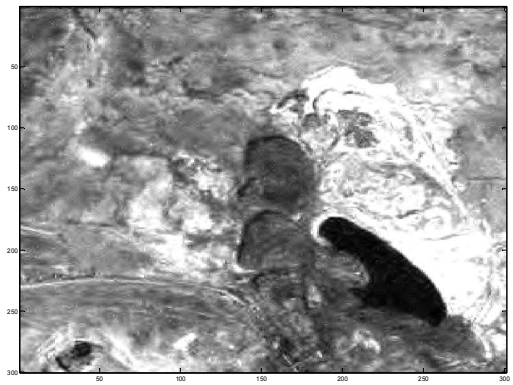


Рис.6. Комплексированное изображение, полученное предложенным методом

Проведенные эксперименты также показали, что предложенный алгоритм имеет быструю сходимость в смысле приближения к некоторой асимптоте для функции стоимости. Извлечение когерентных структур фактически заканчивается за 5-7 итераций. На практике это означает, что не следует ожидать значительного улучшения качества результирующего изображения примерно после семи итераций. Данное обстоятельство позволяет ускорить процесс комплексирования для случая нескольких изображений в библиотеке (больше трех).

Таблица 1

Результаты сравнения

Изображение	ПОСШ, дБ	SSIM
Искаженное гауссовским шумом с σ_z^2 =34 (Nr1)	18,1	0,7045
Искаженное экспоненциальным шумом с σ_z^2 =56 (Nr2)	16,4	0,4215
Комплексированное усреднением	17,8	0,5633
Комплексированное по «правилу отбора максимума»	18,5	0,5547
Комплексированное предложенным методом	23,5	0,8945

Таблица 2

Выбор изображения из библиотеки

Изображение	Nr1	Nr2
Итерация	1, 3, 7, 9,…	2, 4-6, 8

6. Заключение

В работе содержится описание нового эффективного метода комплексирования на основе вейвлет-преобразования, использующего сопоставление когерентных структур зашумленных мультиспектральных изображений. Поскольку предлагаемый метод обладает быстрой сходимостью, то дальнейшие исследования будут сфокусированы на использовании библиотеки вейвлет-базисов, а также подборе когерентных структур в пределах субполос вейвлет-декомпозированных зашумленных изображений.

Данная работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы», номер контракта 16.740.11.0086.

Список литературы

1. Image Fusion: Algorithms and Applications / Ed. Tania Stathaki. Academic Press, 2008. P. 519.

2. Li H., Manjunath B. S., Mitra S.K.. Multisensor Image Fusion using the Wavelet Transform // Graphical Models and Image Processing. 1995. 57. P.235-245.

3. Rockinger O. and Fechner T. Pixel-level image fusion: The case of image sequences // SPIE Proceeding. 1998. Vol.3374, P.378–388.

4. Burt P. and Kolczynski R. Enhanced image capture through fusion // Proceedings of 4th Intl. Conference on Computer Vision, Berlin, 1993. P.173–182.

5. Mallat S. and Zhang Z. Matching pursuits with time-frequency dictionaries // IEEE Transactions on Signal Processing. 1993. 41(12). P.3397-3415.

6. Berger J., Coifman R., Goldberg M. Removing noise from music using local trigonometric bases and wavelet packets // J. Audio Eng. Sci.. 1994. 42(10). P. 808-818.

7. Otazu X., Gonzalez-Audicana M., Fors O. and Nunez J. Introduction of sensor spectral response into image fusion methods. Application to wavelet-based methods. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2005. 43 (10). P.2376–2385.

8. DeVore, R. A. Nonlinear approximation. Acta Numerica, 1998. P. 51-150.

9. Бехтин Ю.С. Теоретические основы вейвлет-кодирования зашумленных сигналов: монография. Рязань, 2009. 124 с.

Получено 02.03.11

Y.S. Bekhtin, Doctor of Sciences, Professor, Automatics And Control Information Technologies Chair, Ryazan State Radioengineering University (e-mail: yuri.bekhtin@yandex.ru)

WAVELET-BASED FUSION OF NOISY MULTISPECTRAL IMAGES USING MATCHING PURSUIT OF COHERENT STRUCTURES

The new fusion method of noisy multispectral images based on matching pursuit of coherent structures is suggested. The fused image is formed as the sum of the best nonlinear approximations of the input images by analysis of the normalized correlations between the pseudo images obtained after extracting coherent structures by thresholding in wavelet domain and the chosen wavelet bases. The results of modeling have shown the advantage of the proposed fusion method in comparing with well-known fusion procedures under PSNR and SSIM criteria.

Keywords: *Wavelet-based Fusion, Noisy Multispectral Images, Matching Pursuit, Coherent Structures.*

МЕДИЦИНСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 615.47

Е.П. Попечителев, заслуженный деятель науки РФ, д-р техн. наук, профессор, кафедра биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (e-mail: eugeny_p@mail.ru)

С.Н. Даровских, канд. техн. наук, доцент, кафедра авиационных комплексов и конструкций летательных аппаратов, Челябинское высшее военное авиационное училище штурманов (тел. 8 912 8921480)

ИНФОРМАЦИОННАЯ ФИЗИОТЕРАПИЯ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА ЕЁ РЕАЛИЗАЦИИ

Представлена термодинамическая оценка особенностей механизмов энергетического и информационного видов воздействий на объекты живой природы и сформулирован новый принцип информационного использования электромагнитных излучений низкой интенсивности для профилактики и лечения широкого спектра заболеваний человека. Приведено краткое описание устройства информационной электромагнитной терапии микроволнового диапазона и основные показатели его эффективности при лечении широкого спектра заболеваний человека.

Ключевые слова: *электромагнитные излучения, гомеостаз, информационная терапия, космический микроволновый фон.*

***

Введение

Природа наделила живые организмы удивительной способностью использовать природные электромагнитные излучения для поддержания своего гомеостаза. Представления о механизмах информационного взаимодействия живых организмов с природным электромагнитным фоном, несмотря на предпринимаемые усилия в этом направлении [1], [2], носят скорее частный, чем системный характер [3]. Однако это не помешало в России и ряде других стран создать целую серию физиотерапевтических устройств, эффективность которых носит противоречивый характер. Эта противоречивость лежит в основе недоверчивого отношения представителей медицинской науки и населения к физиотерапевтическим методам лечения заболеваний человека. *Вместе с тем потенциал информационной терапии огромен*. В медицинской практике нашли применение методы визуальной (с помощью специально подобранных картин или рисунков), музыкальной (подбор мелодий, звуковых рядов и др.), речевой (в психиатрии) и других терапий [4]. К ним следует отнести и вещественные методы, в которых носителем информации выступают фармакологические средства, пищевые добавки и другие вещества, поступающие в организм человека в малых дозах, но содержащие в себе комбинации молекул, которые оказывают существенное управляющее воздействие на состояние организма. В таких вариантах в качестве управляющих воздействий выступает не интенсивность воздействующего фактора, а временные (или пространственные) изменения его параметров, т. е. параметров, несущих определенную информацию для управляемой системы организма. Однако в практической медицине хорошо известно, что широко распространенные фармакологические методы не всегда эффективны, к тому же, в значительной своей части, обладают побочным действием.

В качестве носителя информации может выступать и электромагнитное поле определенной частоты и интенсивности при условии, что в его параметрах тоже содержится необходимая для организма управляющая информация. Обсуждению таких методов терапии, которые

можно отнести к вариантам физиотерапии, посвящена данная статья.

Механизмы энергетического и информационно-энергетического воздействий на объекты живой природы

Предположение о биологической и терапевтической значимости электромагнитных колебаний миллиметрового диапазона длин волн в процессе жизнедеятельности высказано еще в 1965г. коллективом ученых под общим научным руководством академика Девяткова Н.Д. Было высказано несколько гипотез такого влияния, но общепризнанной теории пока создать не удалось, и это обстоятельство тормозит широкое признание этого метода как одного из эффективных методов управлениям состоянием организма человека.

Известно, что электромагнитное загрязнение окружающей среды (так называемый электромагнитный смог), в настоящее время практически исключает информационно-управляющую роль природного электромагнитного фактора в поддержании гомеостаза в организмах, так как природный электромагнитный фон полностью подавлен фоном антропогенного происхождения. Это создает условия для возникновения сложно-предсказуемых негативных последствий для живых организмов, связанных с ухудшением по отношению к ним качества среды обитания, что подтверждается многочисленными исследованиями, проведенными в стране и за рубежом [2].

В этих условиях для разрешения указанной проблемы наиболее целесообразными становятся биофизические подходы, в основе которых лежит реализация принципа не защиты от электромагнитного излучения антропогенного происхождения, а противодействия ему. Сущность такого противодействия [5] состоит в создании искусственного электромагнитного излучения, сравнимого по интенсивности с антропогенными и представляющего собой аналог природного микроволнового фона, располагающегося непосредственно в зоне пребывания живого организма.

Для разработки и создания высокоэффективных устройств электромагнитной физиотерапии необходимо понимание роли и места физического фактора в эволюции живых организмов, а также выявление основных закономерностей взаимодействия их с электромагнитными излучениями. В основе этого лежит оценка особенностей механизмов различных видов воздействий на объекты живой природы.

В задачах исследования взаимодействия живых организмов с окружающей средой особое место занимают энергетические воздействия (ЭВ) ЭМ-излучений, для которых характерна высокая интенсивность, приводящая к нагреву биологических тканей, по сравнению с малоинтенсивными информационно-энергетическими воздействиями (ИЭВ), для которых характерна информационная составляющая излучения, содержащаяся в модуляции параметров излучения [4]. Наиболее существенным в оценке их корректирующих действий является понимание различий их механизмов воздействия на объекты живой природы.

Известно несколько гипотез, объясняющих различия в последствиях ЭВ и ИЭВ. В соответствии с одной из них их различия можно свести к следующим особенностям [6].

Энергетические воздействия–за счет выраженного теплового эффекта направлены непосредственно на рост энтропии биологического объекта S, обусловленный увеличением его температуры за время воздействия на величину $\Delta T=T_2$ –

T_1, где T_1 и T_2 – термодинамические температуры биологического объекта до и после энергетического воздействия соответственно. Изменение ΔS энтропии биологической системы при её переходе из состояния 1 (начальное состояние) в состояние 2 (конечное состояние) не зависит от вида процесса перехода и определяется выражением[1] [7]

$$\Delta S=S_1-S_2= (M/\mu) (C_{v\mu}\cdot\ln(T_2/T_1)),$$

где M – масса вещества; μ – его молярная масса; $C_{v\mu}$ – молярная теплоемкость вещества при постоянном объеме.

Указанный рост энтропии ΔS происходит непосредственно с одновременным увеличением внутренней энергии U биологического объекта на величину ΔU, связанную с изменением энтропии ΔS и другими параметрами соотношением, описывающим второе начало термодинамики:

$$\Delta U = \Delta F + T\cdot\Delta S,$$

где ΔF – изменение свободной части внутренней энергии; T – термодинамическая температура биологического объекта; $T\cdot\Delta S = \Delta E_{связ}$ – изменение связанной части внутренней энергии.

Цель энергетического воздействия состоит в том, чтобы создать необходимые условия для последующего (после прекращения воздействия) уменьшения энтропии путем «включения» в биологических объектах механизмов самосинхронизации или, так называемых, механизмов перехода от “хаоса” к “порядку”. Это происходит благодаря свободной части внутренней энергии ΔF, также сообщенной биологической системе с помощью энергетического воздействия. В этом состоит главная особенность такого воздействия на объекты живой природы.

Указанная особенность накладывает, в свою очередь, определенные ограничения на применение энергетических воздействий для коррекции различного рода нарушений в живых организмах. Эти ограничения связаны с выполнением ряда условий (требований) для эффективного и безопасного их применения в лечебных целях [8]. Одним из таких требований при назначении энергетического воздействия в лечебных целях является состояние ремиссии того или иного заболевания. Только при его выполнении можно запустить с помощью внешнего энергетического фактора в живом организме его механизмы самосинхронизации. В противном случае: в состоянии “разгара” патологического процесса, в период острого его течения, дополнительное, даже кратковременное, увеличение связанной части внутренней энергии $\Delta E_{связ}$ биологической системы за счет внешнего энергетического воздействия, будет стимулировать его развитие и, как следствие, способствовать усилению в ней “хаоса”. Такое воздействие в указанных выше состояниях исключает потенциальную возможность включения в живом организме механизмов перехода от “хаоса” к “порядку”, т. е. запуска механизмов самосинхронизации. ЭВ может привести к появлению отсутствующих ранее патологий из-за мощного воздействия на другие, возможно ослабленные физиологические процессы.

Информационно-энергетические воздействия отличаются от ЭВ тем, что они вызывают изменение внутренней энергии ΔU без изменения связанной её составляющей ($\Delta E_{связ}= 0$). Механизм их корректирующего действия основан на изменении только свободной части внутренней энергии F. По отношению к характеру изменения внутренней энергии возможны

[1] При модельном представлении структуры биологической ткани в виде «идеального газа» [7].

несколько видов информационных воздействий.

Первый из них направлен на стимулирование процессов, приводящих к увеличению потенциала свободной части внутренней энергии F на величину $\Delta F>0$, с последующим её использованием организмом для коррекции нарушений его регуляторных функций. Одним из таких процессов может быть процесс усиления с помощью электромагнитных излучений низкой интенсивности эффективности синтеза аденозинтрифосфата в условиях гипоксии клеточных структур [6]. Такое информационное воздействие свободно от каких-либо ограничений на его применение. При этом его эффективность тем выше, чем раньше оно может быть применено к биологическому объекту *без каких-либо ограничений, связанных с периодом протекания у него того или иного заболевания*.

Этот вид воздействия следует рассматривать как более предпочтительный другому виду, направленному на мобилизацию защитных функций организма. При таком виде воздействия происходит “включение” механизмов регуляции, действие которых основано на использовании (уменьшении) имеющегося в живом организме потенциала свободной энергии F. Изменение свободной энергии в этом случае отрицательно ($\Delta F < 0$). Эффективность такого вида ИЭВ зависит от имеющегося в живом организме запаса свободной энергии. И поэтому его применение для коррекции регуляторных функций в организме не всегда может привести к положительному результату. Подтверждением вышесказанному является опыт применения устройств электромагнитной терапии в экспериментах и медицинской практике [9, 10, 11].

Возможна и комбинация рассмотренных видов информационного воздействия на объекты живой природы. В её основе лежит одновременное воздействие на организм физических факторов, одни из которых направлены на увеличение свободной части внутренней энергии, а другие – на стимулирование его защитных функций, связанных с использованием имеющегося потенциала свободной энергии на организменном уровне. Реализация указанной разновидности ИЭВ на организм человека нашла отражение в ряде разработок физиотерапевтических систем, одна из которых получила название «Мультимедийная система коррекции нарушений регуляторных функций в организме человека».

Мультимедийная система коррекции нарушений регуляторных функций в организме человека

Мультимедийная система коррекции нарушений регуляторных функций в организме человека (рис.1 и 2) представляет собой программно-аппаратный комплекс на базе персональной ЭВМ1.

Аппаратная часть устройства реализована в виде стандартного 5-дюймового модуля (рис.3 и 4), размещена в системном блоке компьютера (рис.5), подключена к его блоку электропитания и обеспечивает преобразование управляющих сигналов для частотной (ЧМ) и амплитудной (АМ) модуляции сверхвысокочастотного (СВЧ) сигнала, а также воспроизведение их в звуковом диапазоне частот. Управляющий сигнал, формируемый программными средствами, передается на вход аппаратной части комплекса по двум каналам. В одном из них он модулируется по амплитуде с

[1] Для усиления терапевтического эффекта предусмотрено воздействие не только ЭМ-излучением, но и звуковыми сигналами, и видеоизображениями. Последние два вида воздействий направлены на стимулирование защитных функций организма.

параметрами модуляции, соответствующими амплитудным низкочастотным электромагнитным вариациям природного происхождения.

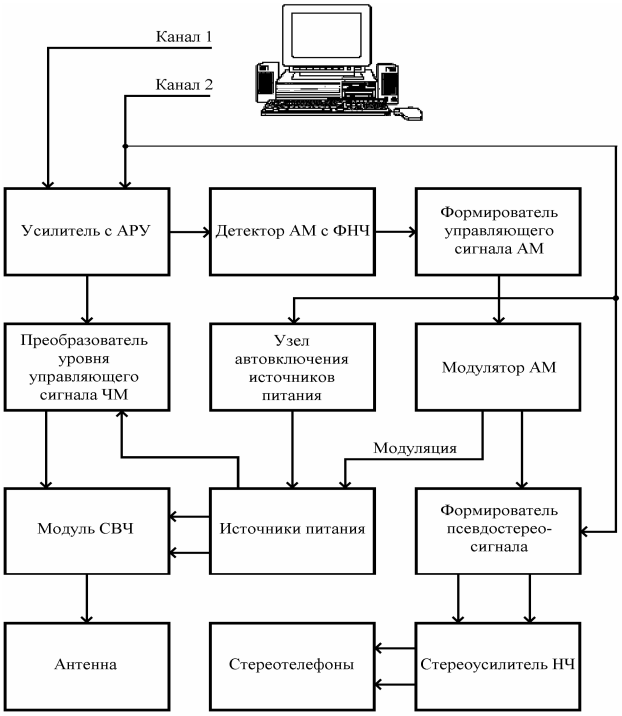


Рис.1. Структурная схема мультимедийной системы

Рис.2. Комплект оборудования системы при проведении процедуры

Рис.3. Внешний вид модульной конструкции

Рис.4. Внешний вид модульной конструкции в корпусе с используемыми в процессе лечения аксессуарами: антенна, стереонаушники

Рис.5. Размещение модульной конструкции в системном блоке и демонстрация проверки системы на излучение

С помощью усилителя с автоматической регулировкой усиления (АРУ) обеспечивается стабилизация в каналах уровня управляющих сигналов. Далее они используются следующим образом. Сигнал без амплитудной модуляции преобразуется по уровню и используется для:

– частотной модуляции СВЧ сигнала, формируемого СВЧ генератором модульной конструкции;

– автоматического включения источников питания;

– воспроизведения его через телефоны.

Сигнал с амплитудной модуляцией детектируется и отфильтровывается фильтром низкой частоты (ФНЧ). Выделенная огибающая используется для амплитудной модуляции ЭМИ путем изменения коллекторного напряжения СВЧ модуля и для противофазной модуляции звукового сигнала. Последнее позволяет

сформировать псевдо стереосигнал. СВЧ сигнал, промодулированный специальным образом по частоте и амплитуде, излучается с помощью антенны.

Звуковой сигнал усиливается в стереоусилителе низкой частоты (НЧ) и может быть прослушан с помощью стандартных стереонаушников. Синхронно с излучением ЭМИ на экран монитора выводятся простые геометрические фигуры, цвет которых определяется частотой управляющего сигнала, а яркость – его амплитудой.

Большой объем исследований по оценке эффективности применения вышеописанной системы был проведен на клинических базах Челябинской государственной медицинской академии и Уральской государственной медицинской академии дополнительного образования (г.Челябинск) в комплексе лечения детей и взрослых при остром обструктивном бронхите, пневмонии, хроническом пиелонефрите, нейросенсорной тугоухости, ревматических заболеваниях (ревматоидный артрит, болезнь Рейтера, реактивный артрит, остеоартроз) и др.

Основными итогами проведенного цикла исследований являются:

– физиотерапия, основанная на использовании аппаратных средств моделирования космического микроволнового фона в диапазоне частот 4,1…4,3 ГГц с плотностью тока, не превышающей 100 мкВт/см^2, *не связана с фазой течения заболевания;*

– эффективность применения аппаратных средств микроволновой терапии достоверно проявляется в снижении активности воспаления, сокращении на (30-40)% потребления лекарственных препаратов и ускоренной (на четверть) нормализации гомеостатических функций организма.

Заключение

Изучение основных характеристик производимого во многих странах мира физиотерапевтического оборудования показывает, что его разработчиками при синтезе лечебных физических воздействий вольно или невольно не учитываются основные положения общей теории функциональных систем. Эти положения связаны, в первую очередь, с тем, что биологические системы – сложные системы, прошедшие сложный и продолжительный путь своего эволюционного развития. Определяющим для них является наличие сложно параметрической и многоуровневой динамической системы управления с разнообразными взаимосвязями её составных частей. Именно эти обстоятельства накладывают особые требования на выбор стратегии управления для восстановления координации взаимодействующих элементов при нарушении гомеостаза в живом организме. Одной из них является стратегия, в основе которой лежит моделирование природного электромагнитного фактора во всем его многообразии. Использование других подходов: попытка с помощью простых однообразных управлений (внешних физических воздействий) решить задачу коррекции нарушений регуляторных функций в организме человека привела к тому, что на мировом рынке физиотерапевтических услуг в настоящее время предлагается техника, которая в лучшем случае является малоэффективной, а в худшем - потенциально опасной. Вместе с тем следует отметить, что материалы, изложенные в статье, отражают только одно, но очень важное (перспективное) направление в использовании электромагнитных излучений для управления гомеостазом человека. Остаются актуальными дальнейшие творческие изыскания в этой области в тесном сотрудничестве биофизиков, технических специалистов и медицинских работников. Необходимо продолжать научно-исследовательские и экспериментальные работы по определению особенностей механизмов взаимодействия ЭМИ различных частотных диапазонов с объектами живой природы, обоснованию наиболее оптимальных режимов лечения, по совершенствованию

конструкции и расширению эксплуатационных возможностей аппаратов электромагнитной микроволновой терапии.

Список литературы

1. Бинги В.Н. Магнитобиология. Эксперименты и модели. 2- е изд. М.: изд-во «МИЛТА», 2000. 592 с.

2. Пряхин Е.А., Аклеев А.В. Влияние неионизирующих электромагнитных излучений на животных и человека / РАМН, Южно-Уральский научный центр. Челябинск, 2007. 219 с.

3. Попечителев Е.П. Системный анализ медико-биологических исследований. Саратов: Научная книга, 2009. 368 с.

4. Попечителев Е.П. Система технических методов управления состоянием человека // Инновационные технологии управления здоровьем и долголетием человека: сб. СПб., 2010. С. 298-309.

5. Даровских С.Н. Информационно-волновое противодействие электромагнитному загрязнению окружающей среды и другим негативным факторам антропогенного происхождения // сб. материалов IV Международной научно-практической конференции: в 2 т. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. Т. 2. С.252-258.

6. Даровских С.Н. Основы построения устройств информационной электромагнитной терапии. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. 138 с.

7. Пономаренко Г.Н., Турковский И.И. Биофизические основы физиотерапии: уч. пособие. М.: Медицина, 2006. 176 с.

8. Пономаренко Г.Н. Физиотерапия. М.: Медицина, 2004. 545 с.

9. Некоторые аспекты информационного подхода в физиотерапии / С.Н. Даровских, А.Н. Узунова, В.М. Бойцов, А.А. Разживин // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2002. №12. С.27-32.

10. Исследование модифицирующего действия на биологические объекты электромагнитных излучений низкой интенсивности в комплексе воздействия их с ионизирующими потоками энергии / С.Н.Даровских, Е.И. Толстых, А.А. Разживин [и др.] // Биомедицинская радиоэлектроника. 1999. №8. С.31-35.

11. Самойлов В.О. Медицинская физика: учебник. СПб.: Спецлит, 2007. 560 с.

Получено 04.03.11

E.P. Popechitelev, Honored Worker of Science of Russian Federation, Doctor of Sciences, Professor, Professor of Biotechnical Systems Chair, St.-Petersburg State Electrotechnical University (e-mail: eugeny_p@mail.ru)

S.N. Darovskikh, Associate Professor, Professor of Department of the Aviation Complexes and Constructions of Aircrafts Chelyabenskiy Higher Military Aviation School of Navigators (тел. 8 912 8921480)

INFORMATION PHYSIOTHERAPY AND HARDWARE OF ITS REALIZATION

The thermodynamic estimation of features of mechanisms of power and information kinds of influences on objects of wildlife is presented and the new principle of information use of electromagnetic radiations of low intensity for preventive maintenance and treatment of a wide spectrum of diseases of the person is formulated. The short description of the device of information electromagnetic therapy of a microwave range and the basic indicators of its efficiency is resulted at treatment of a wide spectrum of diseases of the person.

***Keywords**: electromagnetic radiations, a homeostasis, information therapy, a space microwave background.*

УДК 519.21

Р.А. Томакова, канд. техн. наук, доцент, докторант кафедры биомедицинской инженерии, ЮЗГУ (тел. 4712-58-70-98)

С.А. Филист, д-р техн. наук, профессор кафедры биомедицинской инженерии, ЮЗГУ (e-mail: sfilist@gmail.com)

Л.В. Шульга, д-р мед. наук, профессор кафедры охраны труда и окружающей среды, ЮЗГУ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭРИТРОЦИТОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КРОВИ НА ОСНОВЕ ДЕСКРИПТОРОВ ФУРЬЕ

В статье рассматривается технология исследования формы и размеров эритроцита, заключающаяся в представлении эритроцитометрических данных в виде спектральной гистограммы, полученной на основе описания границ сегментов эритроцитов посредством дескрипторов Фурье. Синтезируется пространство информативных признаков в области комплексных пространственных частот границ сегментов, предназначенное для идентификации патологий, приводящих к изменениям эритроцитарных характеристик крови. Информационные технологии могут быть использованы в автоматизированных системах гематологического анализа.

Ключевые слова: *изображение мазка крови, патологии формы эритроцитов, спектральный анализ, гистограммы амплитудных спектров границ сегмента.*

***

Кровь, будучи внутренней средой организма, несет в себе основы жизнедеятельности различных органов и систем, изучение которых имеет несомненное клиническое значение, необходимое для диагноза, прогноза течения и контроля за терапией практически всех внутренних болезней человека. Наиболее доступным является изучение морфологического состава крови, результаты его входят в алгоритм диагностики большинства патологических процессов.

Эритроциты составляют основную массу форменных элементов крови. Их форма является не только признаком, по которому диагностируется заболевание, но нередко и причиной его. Эритроциты бывают не только нормальными двояковогнутыми дисками (рис. 1, *а*), но принимают и множество аномальных форм (рис. 1). Встречаются эритроциты мишеневидные (*б*), звёздчатые (*е*), серповидные (*г*), менисковидные (*д*), оборванные (*е*), эритроциты в форме рта (*ж*), овальные (*з*) и в форме шариков (*и*).

Специфические изменения формы эритроцитов могут быть признаками ряда врожденных заболеваний. Например, при талассемии (а также при отравлении свинцом) в крови появляются мишеневидные клетки (т. е. эритроциты с окрашенным участком в центре). При серповидноклеточной анемии эритроциты принимают характерную форму серпа.

Результаты микроскопического или автоматического определения диаметра эритроцитов лучше представлять в более наглядной форме — в виде так называемой *эритрометрической кривой* (кривой Прайса-Джонса) или гистограммы распределения различных размеров эритроцитов [1]. По оси абсцисс откладывают значения диаметра эритроцитов в мкм, а по оси ординат — количество клеток данного диаметра. У здорового человека пик эритроцитометрической кривой приходится на диаметр 7,5 мкм. При *микроцитарных анемиях* эритроцитометрическая кривая сдвинута влево, в сторону меньшего диаметра эритроцитов, при *макроцитарных анемиях*— вправо, в сторону клеток большего диаметра. В обоих случаях кривая имеет более пологую форму и более широкое, чем в норме, основание, что отражает наличие анизоцитоза эритроцитов (наличие в крови эритроцитов различной величины).

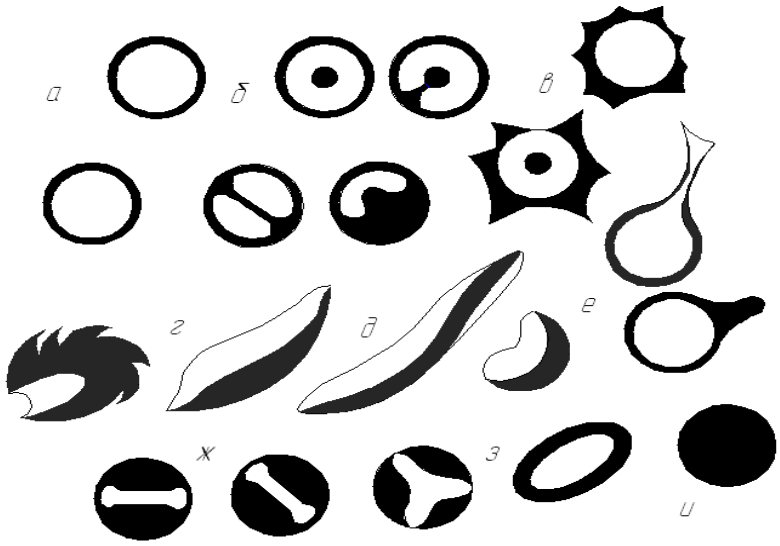


Рис. 1. Виды эритроцитов (в проходящем свете темнее те участки клетки, где толще поглощающий слой гемоглобина): *а* – нормальные (дискоциты); *б* – мишеневидные (платициты); *в* – звёздчатые (акантоциты); *г* – серповидные (дрепаноциты); *д* – полулунные (менискоциты); *е* – оборванные (шизоциты); *ж* – формы рта (стоматоциты); *з* – овальные (эллиптоциты); *и* – шаровидные (сфероциты)

Распределительная эритроцитометрическая кривая Прайс-Джонса не только позволяет графически представить в процентном отношении количество клеток различной величины, но и по широте основания кривой судить о степени имеющегося анизоцитоза.

Представление результатов гематологического анализа в виде эритроцитометрической кривой Прайс-Джонса имеет ряд недостатков. Основной из них – отсутствие возможности количественно оценить уровень анизоцитоза или пойкилоцитоза (изменения формы эритроцитов различной степени выраженности), который является важнейшим признаком патологического изменения эритроцитов. Более того, изменение эритроцитометрических показателей не является специфичным признаком и характерно для ряда заболеваний. Поэтому при постановке дифференциального диагноза необходимо исследовать результаты других лабораторных или инструментальных исследований. В случае использования интеллектуальных систем поддержки принятия решений, в частности нейро-сетевых моделей, результаты анализа необходимо представить в виде вектора информативных признаков. Если речь идет о морфологическом анализе эритроцитов, то в векторе информативных признаков должны отражаться интегральные параметры формы эритроцитов. В качестве таких параметров необходимо выбрать такие параметры, которые бы с одной стороны, передавали в компьютер адекватные эритроцитометрические показатели крови, а с другой – могли быть получены в автоматическом режиме.

Этим требованиям удовлетворяют спектральные характеристики формы эритроцитов, которые получают путем выделения контуров эритроцитов на фотографиях микроскопических изображений мазков крови. Для описания морфологии эритроцита используем спектральный анализ двумерной числовой последовательности, полученной путем оцифровки замкнутой кривой L(x ,y), описывающей границы эритроцита [2].

Двумерную числовую последовательность получают следующим образом. Начиная с произвольного пикселя (x_0, y_0),

принадлежащего L, начинают движение вдоль L, например против часовой стрелки. При этом получают координаты последовательности пикселей границы (x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2),…,(x_{K-1}, y_{K-1}), где K-число пикселей, лежащих на границе сегмента, выбранных для описания кривой L. Используя номер k пикселя, лежащего на границе сегмента, как параметр, можно получить последовательность из K элементов

$$s(k)=[f_1(k), f_2(k)], \quad (1)$$

где k=0, 1, 2,…, K-1.

Сам принцип движения вдоль кривой L, приводящего к выделению контура форменного элемента крови на изображении мазка в виде двумерного массива (1), в данной работе не рассматривается. Такие задачи освещены в соответствующей литературе и известны как задачи сегментации изображений [3].

Двумерная последовательность s(k) может рассматриваться как одномерная, если первый ее элемент принять за действительную часть, а второй элемент – за мнимую часть некоторого комплексного числа, то есть

$$s(k)=f_1(k)+jf_2(k). \quad (2)$$

Таким образом, координаты точки на кривой L x и y рассматриваются как действительная и мнимая части для последовательности комплексных чисел (2). Несмотря на изменившейся способ интерпретации этой последовательности, сущность границы осталась прежней, но такое представление имеет преимущество: оно позволяет свести двумерную задачу к одномерной.

Дискретное преобразование Фурье конечной комплексной последовательности s(k) задается уравнением

$$a(u)=\frac{1}{K}\sum_{k=0}^{K-1}s(k)e^{-j2\pi uk/K}, \quad (3)$$

для u=0, 1, 2,…, K-1. Комплексные коэффициенты a(u) называются Фурье-дескрипторами границы. Обратное преобразование Фурье, примененное к этим коэффициентам, позволяет восстановить границу s(k):

$$s(k)=\sum_{k=0}^{K-1}a(u)e^{j2\pi uk/K}, \quad (4)$$

для k=0, 1, 2,…, K-1.

При получении спектра границ на основе (3) необходимо добиться инвариантности дескрипторов границ к сдвигу и повороту сегмента – эритроцита, а также возможности селекции сегментов с разными масштабами.

При эритроцитометрическом анализе часто возникает задача выделения сегментов определенного класса, при этом сегменты являются производными одного материнского сегмента, полученными в результате масштабного преобразования исходного сегмента. Изменение масштаба изображения может являться как информативным источником, так и помехой. Поэтому в задачу исследований входило определение влияния процедуры масштабирования сегмента на эволюцию его спектра.

Для уменьшения динамического диапазона сигнала в спектральной области перед выполнением преобразования (3) выражение (2) приводилось к следующему виду:

$$\tilde{s}[k]=\left(f_1[k]-\overline{f_1}[n]\right)+j\left(f_2[k]-\overline{f_2}[n]\right), \quad (5)$$

где $\overline{f_\ell}[n]=\frac{1}{K}\sum_{k=0}^{K-1}f_\ell[k]$, (6)

$\ell=1,2$; n – номер сегмента.

Для исследования спектров контуров эритроцитов в среде MATLAB было разработано программное обеспечение.

Программное обеспечение осуществляет следующие операции: 1) выделение сегментов (эритроцитов) на цветном или черно-белом изображениях посредством градиентных операторов; 2) подсчет количества эритроцитов (сегментов) на

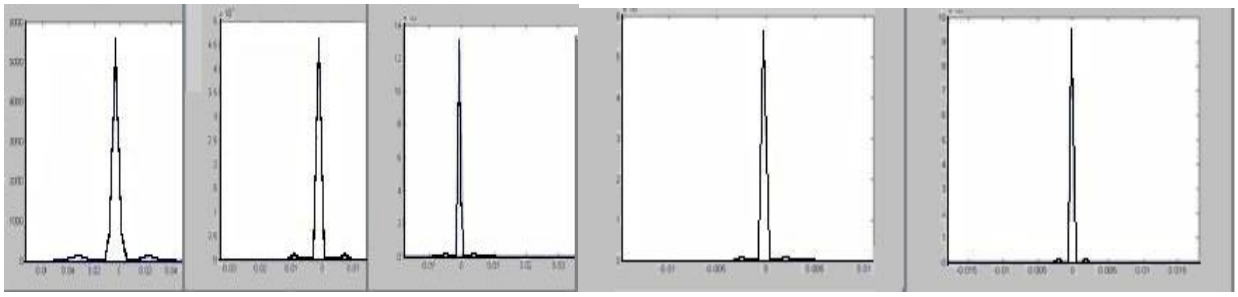
изображении; 3) определение числа пикселей в контуре сегмента; 4) задание числа отсчетов при определении спектра контура (установку «ширины окна» для оконного преобразования Фурье): если число отсчетов в спектре меньше числа пикселей в контуре, то определяется спектр части контура, если число отсчетов в спектре больше числа пикселей в контуре, то определяется спектр периодического продолжения контура сегмента (считается, что контур эритроцита является замкнутой фигурой); 5) определение действительного, мнимого и амплитудного спектра контура; 6) построение гистограмм распределения спектров контуров микроскопической фотографии мазка крови.

Для определения влияния морфологических свойств контура эритроцитов на его спектр были проведены эксперименты с моделями контуров эритроцитов в виде окружностей и в виде эллипсов.

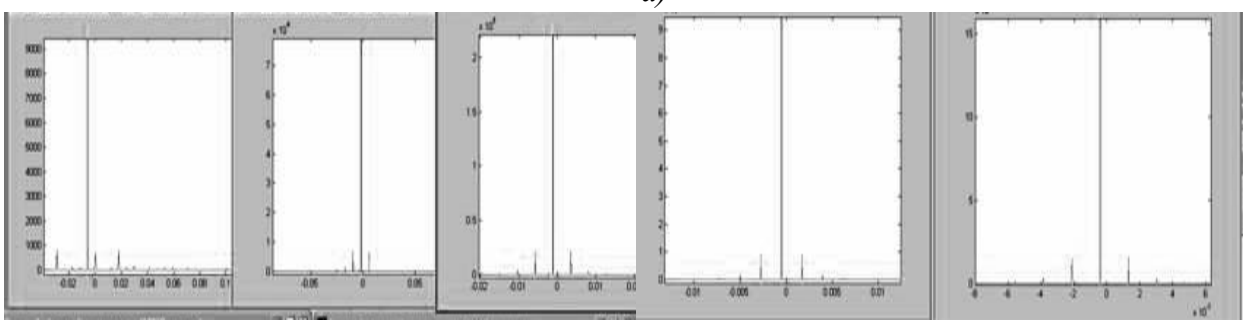
На рис. 2 приведены спектры Фурье пяти контуров в форме окружностей с различными диаметрами и с различной дислокацией в плоскости кадра изображения. Длины окружностей N в пикселях составляли 170, 512, 866, 1786 и 2320 отсчетов (пикселей) с соотношениями диаметров 1:3:5:10:13,6. Дискретное преобразование Фурье определялось в «окнах» K=N (рис.2,а) и в «окнах» K=10N (рис.2, б).

Анализ представленных спектров позволяет сделать вывод, что качественный состав спектров инвариантен к масштабному преобразованию, а увеличение длины «окна» наблюдения сигнала позволяет увеличить разрешающую способность спектрального анализа. В качестве индикаторной частоты можно использовать одну (первую) гармонику.

Для соответствующих сегментов в порядке возрастания радиусов окружностей это гармоники 0,02; 0,006; 0,004; 0,002 и 0,0015 Гц, то есть частота реперной гармоники пропорционально уменьшается с ростом радиуса окружности, соответствующей границы сегмента.



а)



б)

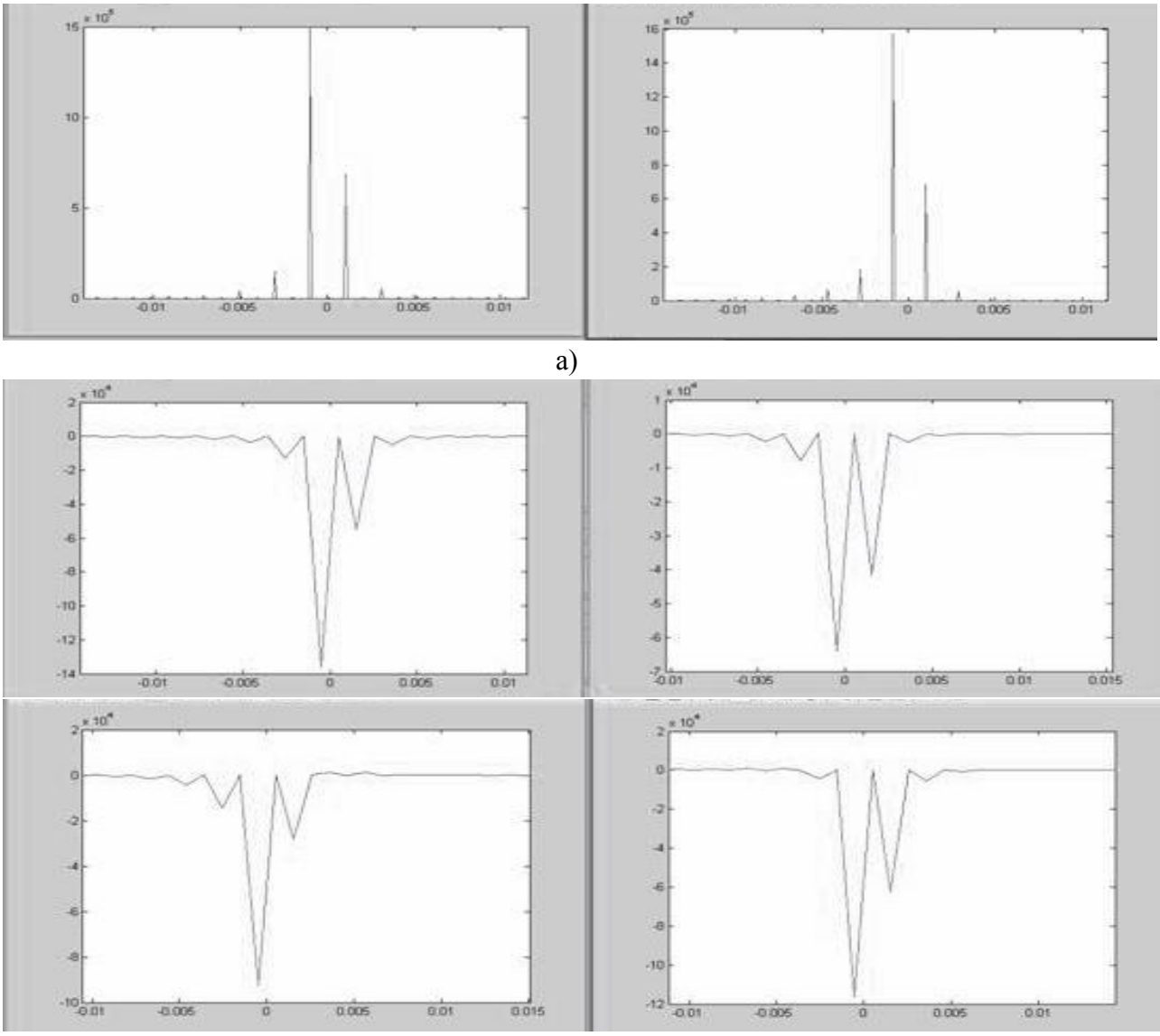
Рис.2. Дескрипторы Фурье пяти сегментов, с границами, описываемыми окружностями различных диаметров, определенными в «окнах» с шириной, равной числу пикселей в границе сегмента (*а*) и равной десятикратному числу пикселей в границе сегмента (*б*)

Из рис. 1 видно, что форма некоторых эритроцитов близка к эллипсу. Так как оси эллипсов ориентированы относительно кадра изображения произвольно, то интерес представляет влияние на спектр не только отклонения формы эритроцита от окружности, но и влияние на спектр ориентации осей эллипса относительно кадра изображения. На рис. 3 представлены результаты таких исследований.

На рис.3*, а* представлены амплитудные спектры границ сегментов в виде эллипсов, ориентированных под углами 30^o и 150^o относительно оси абсцисс.

Несмотря на то, что число отсчетов в границах этих сегментов незначительно отличается, что объясняется особенностями компьютерной графики, их амплитудные спектры практически идентичны.

Вещественные и мнимые спектральные составляющие этих эллипсов представлены на рис. 3, *б*.



а)

б)

Рис. 3. Примеры дескрипторов Фурье: *а)* – амплитудные спектры эллипсов, ориентированных под углом 30^o и 150^o, относительно оси абсцисс; б) - мнимые и действительные спектры одного и того же эллипса, ориентированного различным образом относительно плоскости кадра изображения

Так же, как и в случае амплитудного спектра, мнимый и действительные спектры эллипса имеют две основных спектральных составляющие, соотношение амплитуд которых определяется ориентацией эллипса в плоскости кадра. Соотношением малой и большой осей эллипса определяет амплитуду второй спектральной составляющей. Если эллипс вырождается в окружность, то вторая спектральная составляющая становится пренебрежимо мала.

В результате анализа спектральных характеристик эллипсов и окружностей, примеры которых представлены на рис.2 и рис. 3, сделан вывод о том, что гистограмма спектров эритроцитов, имеющих правильную форму, лежит слева от оси ординат. Наличие в мазке эритроцитов, имеющих формы типа *г*, *д*, *е* и *з* (см. рис.1, приводит к появлению спектральных составляющих справа от оси ординат. При этом их координаты по оси абсцисс будут определяться размером эритроцита.

Так же, как и на кривых Прайса-Джонса, различие в размерах эритроцитов приводит к расширению спектральной гистограммы, но расщепление спектральной гистограммы на две моды позволяет определить, вариация размеров каких эритроцитов приводит к расширению гистограммы: чем больше правая мода спектральной гистограммы, тем больше в мазке эритроцитов неправильной формы.

Спектральная гистограмма позволяет выделить еще одну моду, которая соответствует эритроцитам с формой типа *в* (см. рис.1). На рис.4 слева показан амплитудный спектр границы сегмента для эритроцита этого типа. По сравнению со спектром эритроцита нормальной формы, спектр этого эритроцита расширяется влево и вправо относительно оси ординат.

Как было показано выше, к расширению спектра приводят также макроотклонения формы эритроцита от окружности – эритроциты типа *з* на рис.1. Чтобы сравнить характер этих расширений спектров в правой части рис.4 приведен амплитудный спектр границы сегмента для эритроцита типа *з*. Характерной особенностью спектрограмм рис.4 является то, что сегменты, спектры границ которых представлены на этом рисунке, имеют приблизительно одни и те же размеры. Поэтому по такой спектрограмме можно сравнивать дислокации спектральных составляющих, коррелированных с типом формы границы сегмента. Сравнение таких спектров показывает, что они достаточно разнесены по частотам, причем, чем более симметрична макроформа эритроцита, тем дальше по частотам разнесены эти спектры.

В качестве примера на рис.5,*а* приведена гистограмма амплитудных спектров мазка крови, фрагмент которого с выделенными границами сегментов представлен на рис. 5,*б*.

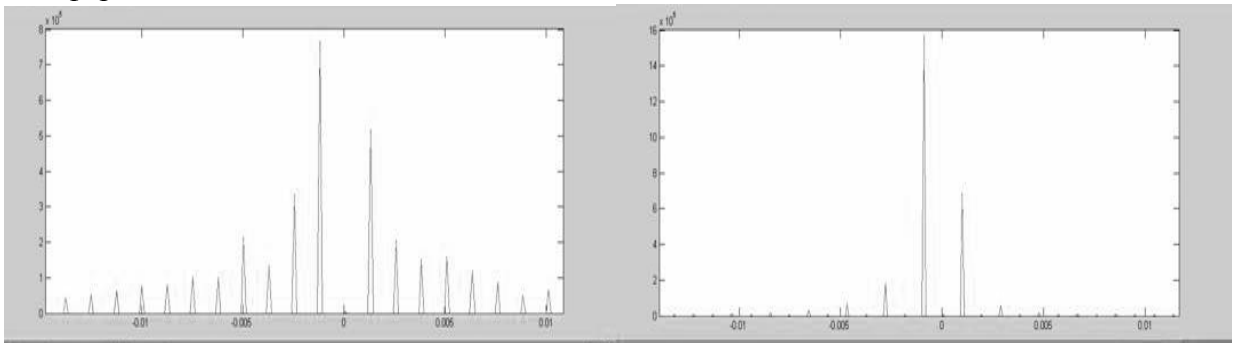
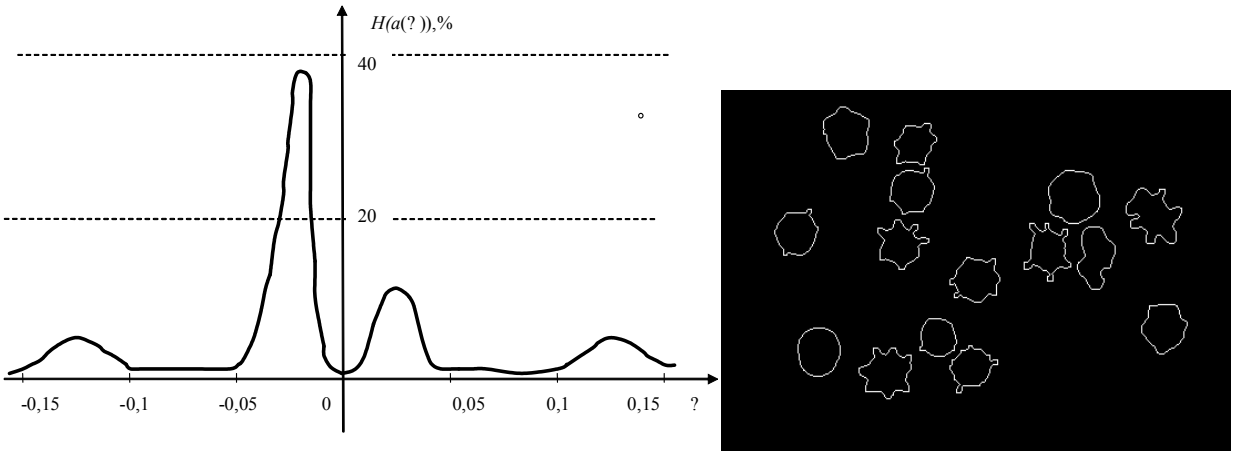


Рис. 4. Амплитудный спектр границы сегмента эритроцита типа *в* (слева) и типа *з* (справа)



а) б)

Рис.5. Гистограмма амплитудных спектров форменных элементов мазка крови (а) и соответствующий фрагмент изображения границ сегментов эритроцитов (б)

Анализ гистограммы рис. 5, *а* показывает, что на ней можно выделить четыре сегмента, поддающиеся количественному описанию. В качестве количественного описания сегментов использовались амплитуда мод, площадь сегмента, «центр тяжести» сегмента и т.п.

Для построения интеллектуальных систем поддержки принятия решений при диагностике патологических отклонений необходимо сравнить гистограммы «нормы» и «патологии» в соответствующем пространстве информативных признаков с последующим вычислением расстояния исследуемого объекта до ближайшего центра кластера, соответствующего норме или патологическому отклонению.

Таким образом, нами предложены информационные технологии для преставления результатов исследования формы и размеров эритроцита, отличающиеся представлением эритроцитометрических данных в виде спектральной гистограммы, полученной на основе описания границ сегментов эритроцитов посредством дескрипторов Фурье, позволяющие синтезировать пространство информативных признаков в области комплексных частот для идентификации патологий, приводящих к изменениям эритроцитарных характеристик крови. Информационные технологии могут быть использованы в автоматизированных системах гематологического анализа.

Статья подготовлена по результатам поисковой научно-исследовательской работы по направлению «Биомедицинские и ветеринарные технологии жизнеобеспечения и защиты человека и животных», выполняемой в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

Список литературы

1. Физиология человека: в 3 т. Т.2: [пер. с англ.] / под ред. Р. Шмидта и Г. Тевса. М.: Мир, 1996. 313 с.

2. Анализ гистологических изображений посредством морфологических операторов, синтезированных на основе преобразования Фурье и нейросетевого моделирования / Р.А. Томакова, С.А. Филист, С.А. Горбатенко [и др.] // Биотехносфера. 2010. №3 (9). С.54-60.

3. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддис С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. М.: Техносфера, 2006. 616 с.

Получено 25.03.11

R. A. Tomakova, Candidate of Engineering; Senior Lecturer; Bio-Medical Engineering Chair; SWSU (tel. 4712-58-70-98)

S. A. Filist, Doctor of Sciences; Professor; Bio-Medical Engineering Chair, SWSU (e-mail: sfilist@gmail.com)

L. V. Shulga, Doctor of Sciences, Professor; Occupational Safety and Environment Protection Chair, SWSU

INFORMATION TECHNOLOGIES FOR STUDYING ERYTHROMETRIC INDICES OF BLOOD ON THE BASIS OF FOURIER DESCRIPTORS

This work considers technology for presentation of the results of studying forms and sizes of erythrocytes consisting in presentation of erythrometric data in the form of spectral histogram obtained on the basis of the description of erythrocytes segments bounds by means of Fourier descriptors. The space of informative signs in the field of complex frequencies of segments bounded, meant for pathology identification, leading to changing erythrocytic characteristics of blood is' being synthesized. Information technologies may be used in automated systems of hematologic analysis.

Keywords: *image of the blood smear, pathology of erythrocytes form, spectral analysis, histogram of amplitude spectra of segments bounds.*

УДК 615.47

Е.П. Попечителев, заслуженный деятель науки РФ, д-р техн. наук, профессор, кафедра биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (e-mail: eugeny_p@mail.ru)

С.А. Филист, д-р техн. наук, профессор кафедры биомедицинской инженерии, ЮЗГУ (e-mail: sfilist@gmail.com)

СПОСОБЫ И МОДЕЛИ ИДЕНТИФИКАЦИИ БИОМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА МНОГОЧАСТОТНОГО ИМПЕДАНСА

В статье рассматривается технология формирования пространства информативных признаков, предназначенного для интеллектуальных систем идентификации биожидкостей, в частности крови, в экспериментах in vivo. Для представления биообъекта используется комбинация теоретических и эмпирических моделей. Посредством представления биоткани в виде суперпозиции эквивалентных импедансов, которые отражают электрические и физиологические условия эксперимента, производится последовательное представление каждого из импедансов параметрической моделью RC-двухполюсника, параметры которого рассчитываются путем решения уравнений модели с левыми частями, определяемыми экспериментально. С целью обеспечения полноты описания системы, исследования биоимпеданса ведутся на множестве частот.

Ключевые слова: *неинвазивный анализ крови, многочастотный импедансный анализ, нейронные сети.*

***

В процессе жизнедеятельности человек подвергается различным внешним воздействиям, которые приводят к изменению функционального состояния его органов и систем. Для своевременного обнаружения критического состояния, которое требует корректирующего воздействия на ту или иную систему или на человека в целом, необходим мониторинг функционального состояния. Для этого выбирают континуум контролируемых параметров, посредством которых может быть получена информация о функциональном состоянии того или иного органа или системы, а также модель её динамики.

Совместно с данными о внешних воздействиях на живую систему такая информация позволяет оптимизировать управляющее воздействие на организм, формировать комплексы лечебно-

оздоровительных процедур и проводить мероприятия, направленные на снижение экологического риска социально-значимых заболеваний.

Наиболее релевантным показателем динамики функционального состояния живой системы является кровь. Однако большинство способов исследований показателей крови используют инвазивные методы и не обладают необходимой оперативностью. Импедансные методы анализа лишены этих недостатков, но в настоящее время отсутствуют методы, позволяющие на основе биоимпедансных исследований сформировать пространство информативных признаков, позволяющее идентифицировать функциональное состояние органов и систем человека, а так же построить модель его динамики.

Удельное электрическое сопротивление биоткани и крови, в частности, является сложной функцией частоты зондирующего тока. Эта функция часто представляется в виде графика Коула [1].

Экспериментальные исследования показали, что модели биоимпеданса отличаются в зависимости от того, исследуется ли в качестве биоматериала кровь или биоткань. Это объясняется тем, что кровь содержит один доминирующий вид клеток, а ткань человека содержит клетки различного типа. Поэтому необходимо исследовать графики Коула для переменной составляющей импеданса, которая связана с величиной кровенаполнения и импеданс которой определяется составом крови, и базисной составляющей, величина которой определяется импедансом биотканей.

Так как наличие вирусной инфекции изменяет химический состав клеток крови и биотканей, то это приводит к деформации кривой Коула. Для выделения информативных признаков в процессе многочастотных биоимпедансных исследований кривая Коула может быть замкнута посредством известных способов и, следовательно, как любая периодическая функция представлена в виде дискретного преобразования Фурье:

$$\dot{Z}(\Omega^{(m)}) = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\dot{z}(\omega^{(n)})\times\exp\left(-j\frac{2\pi n\Omega^{(m)}}{N}\right), \quad (1)$$

где n – номер частоты зондирующего биообъект тока (изменяется от 1 до N); $\dot{z}(\omega^{(n)})$ - комплексное сопротивление биообъекта на частоте зондирующего тока с номером n; $\Omega^{(m)}$ - номер частотной составляющей Фурье-представления кривой Коула.

Для диагностики инфекционных заболеваний предлагается следующая методика. В опытах *in vivo* исследуемый биоматериал подключается к источнику гармонического сигнала с перестраиваемой частотой. В эксперименте используются N гармоник. Разделив биоимпеданс на переменную (кровь) и базовую (биоткань + кровь) составляющие, получаем две кривых Коула, которые преобразуются в спектр Фурье согласно уравнению (1). Полученные два признаковых подпространства используются для формирования входных векторов соответствующих нейронных сетей, обученных на соответствующую вирусную инфекцию.

Выходы нейронных сетей интерпретируются как уверенности в инфицировании данным вирусом, определенные по факторам импеданса крови и импеданса биоткани. Эти выходы интерпретируются как нечеткие числа и поступают на вход агрегатора, в котором вычисляется окончательная уверенность в инфекционном заболевании.

Структурная схема устройства, позволяющего выполнить вышеописанную процедуру, приведена на рис. 1.

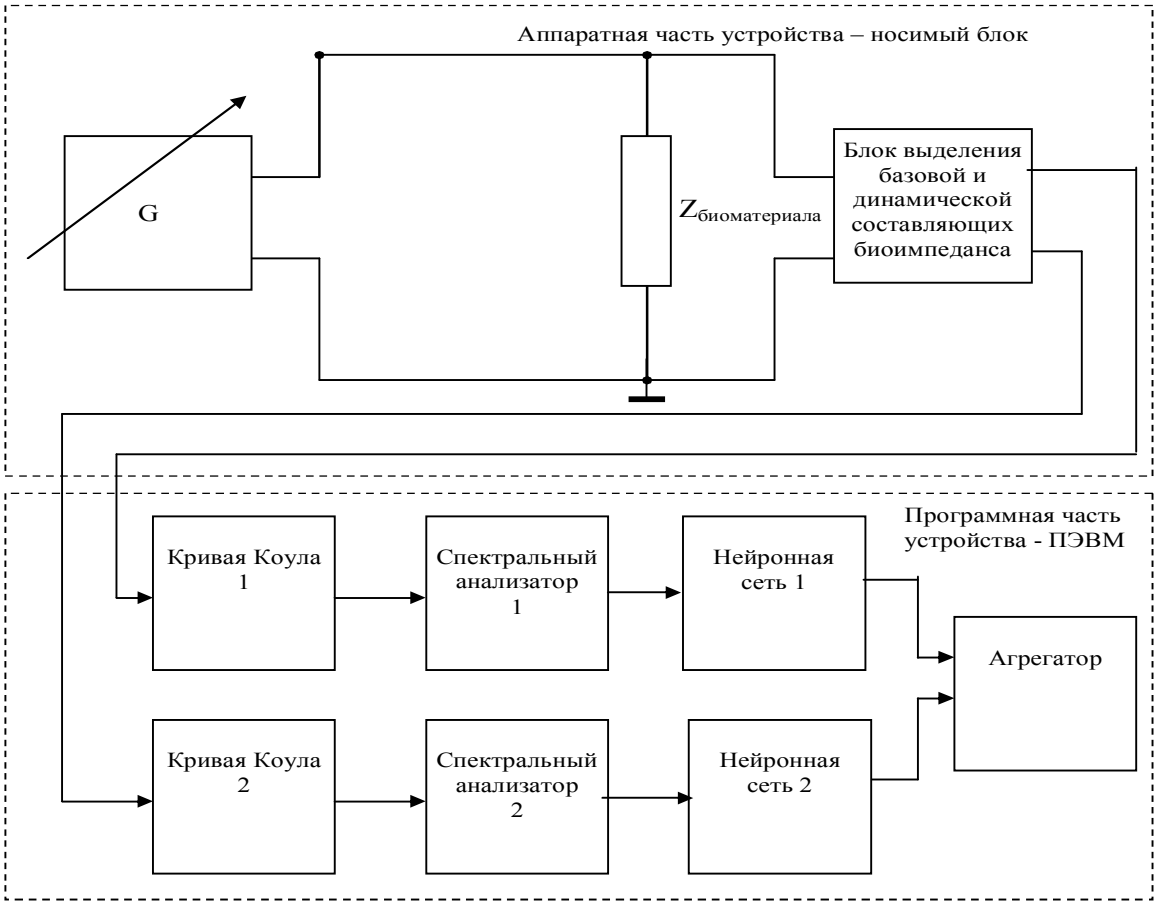


Рис. 1. Структурная схема аппаратно-программной реализации многочастотного биоимпедансного мониторинга для неинвазивного анализа крови

Устройство состоит из двух частей: носимого блока, который является носимым медицинским прибором (может быть выполнен на контроллере, например, PIC 18) и программного обеспечения, которое обеспечивается персональным компьютером. В базе данных компьютера имеется множество моделей нейронных сетей и агрегаторов, настроенных на инфекционное заболевание. На выходе агрегатора выдается число (в диапазоне 0…1), которое характеризует уверенность в тестируемом инфекционном заболевании. Окончательное решение принимается специалистом после изучения анамнеза и, при необходимости, проведения лабораторных исследований.

Для реализации вышепредставленной методики биоимпедансных исследований необходимо математическое и алгоритмическое обеспечение, позволяющее сформировать на входах нейронных сетей соответствующие вектора информативных признаков. Однако модель биоимпеданса, представленная графиком Коула, не позволяет добиться высокой диагностической эффективности при идентификации общих инфекционных заболеваний, что обусловлено дисперсией графика Коула [1]. Поэтому целесообразно использовать комбинированные модели биоимпеденса с последующим построением гибридных моделей распознавания [1].

При идентификации биофизических свойств биообъекта последний может быть представлен в виде четырехполюсника, как правило, пассивного. При этом, входным воздействием является сила тока, подво-

димого к объекту, а выходным – падение напряжения на нем (или наоборот).

Для таких сложных систем, как биообъект, использование обобщенных теоретических моделей весьма затруднительно в связи со сложностью их анализа и низкой точностью, обусловленной конечной точностью используемых для построения модели закономерностей. Из-за этого, обычно используются упрощенные теоретические модели, достаточно точные, но справедливые только в узких рамках конкретного эксперимента. Главным преимуществом теоретических моделей является то, что при их построении полностью отсутствует необходимость в экспериментальных данных.

Эмпирические модели значительно более абстрактны и позволяют одновременно описывать множество объектов с заданной точностью, не накладывая существенных ограничений на условия эксперимента. Поэтому, при системном подходе, такие модели рассматриваются чаще всего. Эмпирические модели строятся на основании общих характеристик системы, таких как стационарность, статичность и линейность. Поэтому предпочтение отдадим комбинированным моделям, позволяющим использовать преимущества как тех, так и других моделей, разбив весь процесс моделирования на этапы, чередующие процессы теоретического и эмпирического моделирования.

Эквивалентная схема позволяет представить исследуемый участок биообъекта в виде пассивного многоэлементного двухполюсника. Многоэлементный двухполюсник состоит из двух последовательно соединенных комплексных сопротивлений. Принципиальная электрическая схема этого двухполюсника показана на рис. 2,*а*. Она включает два последовательно соединенных комплексных сопротивления, которые моделируют межэлектродное сопротивление (сопротивление электрод-кожа) и сопротивление биоткани: Z_1 – эквивалентный импеданс перехода электрод-кожа; $\tilde{Z}$ – составляющая импеданса, определяемая состоянием тканей и зависящая от объёма внутриклеточной жидкости, морфологии межклеточного пространства и ударным объёмом кровотока. В сопротивление Z_1 входят следующие элементы: C_1 – эквивалентная ёмкость электрод-кожа, R_1 – эквивалентное активное сопротивление перехода электрод-кожа.

Принимая во внимание вышесказанное, эквивалентная схема на рис. 2,*а* примет вид, показанный на рис. 2,*б*. Суммарное комплексное сопротивление эквивалентной схемы рис. 2,*а* можно представить как

$$Z(\omega) = a(\omega) + jb(\omega) \qquad (2)$$

и определить параметры $a(\omega)$ и $b(\omega)$ на множестве частот, получив таким образом информативные признаки для многочастотного биоимпедансного анализа, которые иллюстрируются графиком Кола [1].

Обратившись к рис. 2, б, мы видим, что наиболее информативным параметром является $\tilde{Z}$, а ёмкость C_1 и активное сопротивление R_1 могут быть отнесены к мешающим факторам, так как зависят от конструкции и геометрии электродов, а также от физико-химического состояния исследуемого пациента. Поэтому целесообразно структурировать параметры a и b комплексного сопротивления биообъекта.

С этой целью получим выражение для комплексного сопротивления двухполюсника (рис. 2, а)

$$Z = Z_1 + \tilde{Z}, \qquad (3)$$

где Z_1 – комплексное сопротивление контакта электрод-биообъект.

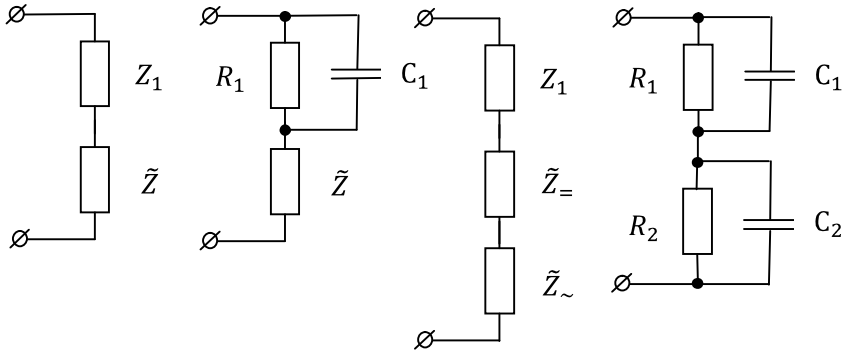


Рис. 2. Эквивалентные схемы биообъекта в виде многоэлементного двухполюсника

Учитывая, что C_1 включено параллельно R_1, и структурируя $\tilde{Z}$ на действительную и мнимую части, выражение (2) можно переписать в следующем виде:

$$Z = \frac{1}{j\omega C_1 + \frac{1}{R_2}} + x + jy, \qquad (4)$$

$x = \mathrm{Re}\,\tilde{Z}$, $y = \mathrm{Im}\,\tilde{Z}$.

Выполнив соответствующие преобразования в (4), получим

$$Z(\omega) = \frac{R_1 + x(\omega) - \omega C_1 R_1 y(\omega) + j(y(\omega) + \omega C_1 R_1 x(\omega))}{j\omega C_1 R_1 + 1}. \qquad (5)$$

Заменяя в (5) левую часть на (2), представляем комплексное уравнение (5) в виде системы двух уравнений, соответствующих равенству мнимой и действительной составляющих в уравнении (5).

$$\begin{cases} a(\omega) - b(\omega) C_1 R_1 = R_1 + x(\omega) - \omega C_1 R_1 y(\omega)) \\ a(\omega)\omega C_1 R_1 + b(\omega) = \omega C_1 R_1 x(\omega) + y(\omega). \end{cases} \qquad (6)$$

Величины $x(\omega)$ и $y(\omega)$ находятся согласно известным соотношениям [2]:

$$x(\omega) = \frac{R_2}{1 + \omega^2 C_2{}^2 R_2{}^2},$$

$$y(\omega) = -\frac{\omega C_2{}^2 R_2{}^2}{1 + \omega^2 C_2{}^2 R_2{}^2}. \qquad (7)$$

Уравнения (7) были получены согласно эквивалентным схемам рис. 2,б и 2,г.

В системе уравнений (6) неизвестными являются параметры $, C_1, R_1, x(\omega)$ и $y(\omega)$, а параметры $a(\omega)$ и $b(\omega)$ определяются экспериментально.

Таким образом, чтобы идентифицировать модель рис. 2,б достаточно выполнить эксперимент на двух частотах– ω_A и ω_B –при условии, что C, R_1, Z не зависят от частоты.

Но даже при условии частотной независимости параметров эквивалентной схемы, исследование такого признакового пространства неэффективно при биоимпедансометрии крови, так как параметры C_1, R_1 несут информацию о составе крови, а параметр $\tilde{Z}$ только частично связан с составом крови.

В связи с вышеизложенным, представим $\tilde{Z}$ в виде

$$\tilde{Z} = \tilde{Z}_= + \tilde{Z}_\sim, \qquad (8)$$

где $\tilde{Z}_=$ – базовая часть биоимпеданса тканей,

$\tilde{Z}_\sim$ – составляющая биоимпеданса тканей, полностью определяемая импедансом крови и изменяющаяся в зависимости от ударного объема с частотой сердечных сокращений.

$$\tilde{Z}_\sim = \frac{1}{T}\int_T \tilde{Z}\ (t)\sin(\Omega t + \Psi)dt, \qquad (9)$$

где Ω – частота сердечного ритма; Ψ – сдвиг фаз опорного сигнала, максимизирующий сигнал на выходе синхронного детектора. Эквивалентная схема такого представления показана на рис. 2,в.

Для того, чтобы воспользоваться уравнением (9), необходимо получить $\tilde{Z}$ как функцию времени $\tilde{Z}(t)$ на фиксированной частоте зондирования биообъекта, для чего необходимо повысить чувствительность измерения биоимпеданса.

Если для измерения биоимпеданса биообъекта использовать устройство, описанное в [3], то с этой целью на компенсационных входах синхронных детекторов необходимо создать напряжения, соответственно

$$U_{K1} = \dot{I}_{çîíä}(a - x);$$

$$U_{K2} = I_{çîíä}(b - y); \qquad (10)$$

где $I_{çîíä}$ – модуль зондирующего биообъект тока.

Принимая во внимание (10), (7), можно записать как

$$\tilde{Z}(t) = x_1 + x_2(t) + j(y_1 + y_2(t)), \qquad (11)$$

где $\tilde{Z}_{=} = x_1 + jy_1$,

$\tilde{Z}_{\sim}(t) = x_2(t) + jy_2(t)$.

Пренебрегая нестационарностью параметров уравнения (10) на интервале T_1 можем записать:

$$x_2 = \frac{1}{T_1}\int_{T_1} x_2(\theta)d\theta,$$

$$y_2 = \frac{1}{T_1}\int_{T_1} y_i(\theta)d\theta. \qquad (12)$$

Для определения параметров уравнения (11) запишем следующую систему уравнений с левыми частями, определяемыми в процессе измерений:

$$\begin{cases} R_e\tilde{Z} = x_1 + x_2; \\ I_m\tilde{Z} = y_1 + y_2. \end{cases} \qquad (13)$$

При этом согласно (8) и (11)

$$\begin{cases} x_2 = \dfrac{1}{T_1T_2}\int\limits_{T_1}\int\limits_{T_2} R_e\tilde{Z}(t,\theta)\sin(\Omega t + \Psi_1)dtd\theta; \\ y_2 = \dfrac{1}{T_1T_2}\int\limits_{T_1}\int\limits_{T_2} I_m\tilde{Z}(t,\theta)\sin(\Omega t + \Psi_2)dtd\theta. \end{cases} \qquad (14)$$

При этом

$$\begin{cases} x_1 = R_e\tilde{Z} - x_2; \\ y_1 = I_m\tilde{Z} - y_2. \end{cases}$$

Отличительной особенностью представленного способа синтеза пространства информативных признаков для идентификации биожидкостей в экспериментах in vivo состоит в том, что с целью снижения дисперсии графика Кола тетрада информативных признаков $\{x_1, x_2, y_1, y_2\}$ формируется не на одной частоте, а на паре частот ω_A, ω_B. Следовательно, для каждой пары тестовых частот будет построена своя модель. Поэтому нет смысла вводить поправочный коэффициент α в уравнении (5), предложенный для снижения дисперсии кривой Кола, а релевантность моделей, а, следовательно, и релевантность частот зондирующих токов, может быть определена в процессе обучения конкретно для своей патологии.

Таким образом, используя континуум пар частот, на которых определяются параметры моделей биообъекта, было получено пространство информативных признаков включающее множество тетрад, каждая из которых соответствует определенной паре тестовых частот.

Статья подготовлена по результатам поисковой научно-исследовательской работы по направлению «Биомедицинские и ветеринарные технологии жизнеобеспечения и защиты человека и животных», выполняемой в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

Список литературы

1. Grimnes S., Martinsen O. G 2005 Cole electrical impedance Model-a critique and an alternative IEEE Transactions on Biomedical Engineering 52 132-5.

2. Зевеке Г.В., Ионкин П.А. Основы теории цепей: учебник для вузов. Изд. 4-е перераб. М.: Энергия, 1975. 752 с.

3. Кассим А., Кабус Дерхим, Филист С.А., Авад Али Абдо Мохаммед. Носимый медицинский прибор для диагностики вирусных инфекций // Медико-экологические информационные технологии-2010: матер. XIII Междунар. науч.-техн. конф. / Курск. 2010. С. 120-123.

Получено 15.03.11

E.P. Popechitelev, Honored Worker of Science of Russian Federation, doctor of sciences, Professor, Professor Biotechnical Systems Chair, St.-Petersburg State Electrotechnical University (e-mail: eugeny_p@mail.ru)

S.A. Filist, Doctor of Science; Professor; Department of Bio-Medical Engineering; SWSU (e-mail: sfilist@gmail.com)

WAYS AND MODELS OF IDENTIFICATION OF BIOMATERIALS ON THE BASIS OF THE ANALYSIS OF THE MULTIFREQUENCY IMPEDANCE

In article the technology of formation of space of the informative signs intended for intellectual systems of identification of bioliquids, in particular blood, in experiments in vivo is considered. For bioobject representation the combination of theoretical and empirical models is used. By means of representation of a biofabric in the form of superposition of equivalent impedances which reflect electric and physiological experimental conditions, it is made consecutive representations of each of impedances by parametrical model of the RC-two-pole which parameters pay off by the decision of the equations of model with the left parts defined experimentally. For the purpose of maintenance of completeness of the description of system, bioimpedance research are conducted on set of frequencies.

Keywords: *the noninvasive analysis of blood, the multifrequency impedance analysis, neural networks.*

К сведению авторов

1. К публикации в «Известиях Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение» принимаются актуальные материалы, содержащие новые результаты научных и практических исследований, соответствующие профилю журнала, не опубликованные ранее и не переданные в редакции других журналов.

2. Объем статьи не должен превышать 10 страниц печатного текста, включая иллюстрации и таблицы.

3 Авторы статей должны представить в редакцию журнала:

- статью, оформленную в соответствии с правилами оформления статей, представляемых для публикации в журнале;
- рекомендацию кафедры или научно-исследовательского отдела учреждения, в котором выполнена данная работа;
- разрешение на опубликование в открытой печати статьи от учреждения, в котором выполнена работа (обязательно для статей по техническим специальностям, по экономическим- по требованию редколлегии);
- сведения об авторах (фамилия, имя отчество, место работы, должность, ученая степень, звание, почтовый адрес, телефон, e-mail);
- электронный носитель (CD-диск).

4. Бумажный вариант статьи подписывается всеми авторами, что означает их согласие на передачу Университету прав на распространение материалов статьи с помощью печатных и электронных носителей информации.

5. Редакция не принимает к рассмотрению рукописи, оформленные не по правилам.

6. **Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается (если автор один и им представлена справка с места учебы).**

7. Основной текст рукописи статьи (кроме аннотации и ключевых слов) набирают в текстовом редакторе MS WORD шрифтом «Times New Roman» размером 14 пт с одинарным интервалом, выравнивание по ширине. Поля с левой стороны листа, сверху и снизу – 2,5 см, с правой стороны-2 см. Абзацный отступ – 1,5 см.

8. Схема построения публикации: УДК, авторы, название, аннотация и ключевые слова, текст с рисунками и таблицами, литература. Авторы, название, аннотация и ключевые слова приводятся на русском и английском языках.

9. Для набора формул и переменных следует использовать редактор формул Microsoft Equation 3.0 (Вставка- Объект- Создание - Microsoft Equation) с размерами: обычный – 14 пт; крупный индекс 12 пт, мелкий индекс – 10 пт; крупный символ – 16 пт; мелкий символ – 10 пт.

Необходимо учитывать, что полоса набора- 75 мм. Если формула имеет больший размер, ее необходимо упростить или разбить на несколько строк. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**

Все русские и греческие буквы (Ω, η, β, μ, ω, υ и др.) в формулах должны быть набраны прямым шрифтом. Обозначения тригонометрических функций (sin, cos, tg и т.д.) – прямым шрифтом. Латинские буквы – курсивом.

Статья должна содержать лишь самые необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться.

10. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

11. Рисунки и таблицы располагаются по тексту. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Иллюстрации, встраиваемые в текст, должны быть выполнены в одном из стандартных форматов (TIFF,JPEG,PNG) с разрешением не ниже 300 *dpi* и публикуются в черно-белом (градации серого) варианте. Качество рисунков должно обеспечивать возможность их полиграфического воспроизведения без дополнительной обработки. **Рисунки, выполненные в MS Word, недопустимы**.

Рисунки встраиваются в текст через опцию «Вставка-Рисунок-Из файла» с обтеканием «В тексте» с выравниванием по центру страницы без абзацного отступа. Иные технологии вставки и обтекания **не допускаются.**

12. **Список литературы к статье обязателен** и должен содержать все цитируемые и упоминаемые в тексте работы. Пристатейные библиографические списки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Ссылки на работы, находящиеся в печати, не допускаются. При ссылке на литературный источник в тексте приводится порядковый номер работы в квадратных скобках.

13. В материале для публикации следует использовать только общепринятые сокращения.

Все материалы направлять по адресу: 305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94. ЮЗГУ, редакционно-издательский отдел.

Тел.(4712) 50-48-19, тел/факс (4712) 50-48-14.

E-mail: rio_kursk@mail.ru.