

**ВЕСТНИК
САРАТОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

2015

№ 2 (79)

Научно-технический журнал

Издается с 2003 г.

Выходит один раз в квартал

Май 2015 года

*Журнал включен в перечень ведущих
рецензируемых журналов и научных изданий,
утвержденный президиумом ВАК
Министерства образования и науки РФ,
в которых публикуются основные научные
результаты диссертаций на соискание
ученых степеней доктора и кандидата наук*

**Главный редактор
Заместитель главного редактора
Ответственный секретарь**

д.и.н., профессор И.Р. Плева
д.т.н., профессор А.А. Сытник
д.ф.-м.н., профессор В.В. Астахов

Редакционная коллегия: д.т.н., проф. И.И. Артюхов, д.ф.-м.н., проф. В.В. Астахов,
д.ф.-м.н., проф. В.Б. Байбурун, д.ф.-м.н., проф. Д.А. Зимняков, д.т.н., проф. В.А. Крысько,
д.т.н., проф. В.Н. Лясников, д.т.н., проф. И.В. Родионов, д.т.н., проф. А.А. Сытник,
д.т.н., проф. Ю.Б. Томашевский, д.т.н., проф. В.А. Хрусталева

Редактор Л.А. Скворцова
Компьютерная верстка Н.В. Лукашовой
Перевод на английский язык А.Х. Аскаровой
Ответственный за размещение полнотекстовой версии журнала
на сайте eLIBRARY.ru М.И. Балакин

Адрес редакции:
Саратов, 410054, ул. Политехническая, 77
Телефон: (845 2) 99-87-39
E-mail: vestnik@sstu.ru
<http://dni.sstu.ru/vestnik.nsf>
Факс: (845 2) 52-53-02

Подписано в печать 15.05.14
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 19,00 Уч.-изд. л. 10,0
Тираж 500 экз. Заказ 68
Отпечатано в Издательстве СГТУ,
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Полная электронная версия журнала размещена в системе РИНЦ
в открытом доступе на платформе eLIBRARY.RU

Подписной индекс 18378
(каталог «Газеты. Журналы» на 2-е полугодие 2015 г.)



Scientific Journal

Since 2003

Once in a quarter

May 2015

This journal is included into the list of leading reviewed journals and scientific publications approved by the presidium of Ministry of Education and Sciences of Russian Federation where major scientific thesis's results for academic degree competition for a doctor and a candidate of sciences

Editor-in-chief
Editor-in-chief assistant
Executive secretary

Professor I.R. Pleve
Professor A.A. Sytnik
Professor V.V. Astakhov

Editorial board: prof. I.I. Artyukhov, prof. V.V. Astakhov, prof. V.B. Bayburin, prof. D.A. Zimnyakov, prof. V.A. Krysko, prof. V.N. Lyasnikov, prof. I.V. Rodionov, prof. A.A. Siytnik, prof. Yu.B. Tomashevsky, prof. V.A. Khrustalev

Editor L.A. Skvortsova
Computer-based page-proof N.V. Lukashova
Rendering A.H. Askarova
Responsible for the full-text version of the magazine
Online eLIBRARY.ru M.I. Balakin

Editorial office: 77, Politechnicheskaya Street
Saratov, 410054
Russia
Telephone: +8452/99-87-39
E-mail: vestnik@sstu.ru
<http://dni.sstu.ru/vestnik.nsf>
Fax: +8452/52-53-02

Signed for publishing: 15.05.15
Format 60×84 1/8 Paper offset.
Apr. tp. l. 19,00 Acc.-pbl. 10,0
Edition 500 psc. Order 68
Printed in publishing house of SSTU,
77, Politechnicheskaya St., Saratov, 410054,
Russia

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

Землянухин А.И., Бочкарев А.В. Новые точные решения обобщенного уравнения Конно – Камеямы – Сануки.....	5
Салтыкова О.А., Папкина И.В., Кашубина А.А., Синичкина А.О., Вецель С.С., Крысько В.А. К вопросу о сценариях перехода колебаний из гармонических в хаотические гибких балок Эйлера-Бернулли при произвольных поперечных нагрузках	9
Шляхов С.М., Кривулина Э.Ф. Определение допускаемой и предельной нагрузок на брус круглого поперечного сечения из пористого материала при кручении	17
Шляхов С.М., Кривулина Э.Ф. Оценка надежности по устойчивости составной стойки в рамках теории стационарных случайных процессов	21

ФИЗИКА

Кузнецов А.П., Седова Ю.В. Автономная и связанная модели, демонстрирующие гиперхаос.....	26
Курчатов И.С., Кустов Д.М. Исследование материалов для ик лазеров на основе полупроводников $A^{IV}B^{VI}$ легированных ионами Ni^{2+}	32

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Гришанов И.А., Бржозовский Б.М. Анализ процесса резания с использованием фильтра Калмана	38
Жевалев О.Ю., Приходько М.А., Куц Л.Е. Быстростъемная энергоэффективная система радиационного нагрева для диффузионной сварки	43
Иванов В.В., Решетников М.К. Компьютерное имитационное моделирование процесса гидроабразивного резания.....	46
Игнатъева С.С., Игнатъев С.А. Методические аспекты управления факторами качества в производстве подшипников	49
Игнатъев А.А., Самойлова Е.М. Модель автокорреляционной функции виброакустических Колебаний при резании в динамической системе станка. Часть 1.....	53
Клочкова Н.Н., Обухова А.В., Проценко А.Н., Брятов А.С. Моделирование индукционной установки специального назначения средствами программного пакета Flux	57
Красильников А.Я., Кравченко К.Ю. Интенсификация режимов концевой фрезерования по критерию асимптотической устойчивости	64
Перевозникова Я.В., Перекрёстов А.П., Вавилина Н.А. Математическая модель и методика определения расчётных режимов технологического процесса диффузионной сварки с термическими системами давления.....	71
Склярков И.А., Захаров О.В. Опытные-промышленные испытания установки для абразивно-струйной обработки.....	76
Шейко Л.И., Приказчиков С.Я. Основные классификационные признаки и классификация многокоординатных зубообрабатывающих станков.....	81

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Бороденкова И.В., Царев В.А. Моделирование характеристик триодной части мощного многолучевого клистрода-умножителя частоты.....	85
Бровко А.В., Пахарев Р.С. Метод реконструкции внутренней структуры диэлектрических материалов переменной формы с использованием искусственной нейронной сети 90	90
Василевский В.Г. Вероятностное логическое понятие	89
Костюк В.П., Хействер А.А. Разработка и исследование моделей и методов маршрутизации движения пассажиров общественным транспортом	103
Куликов В.Б. Реконструкция функций плотности вероятности на модельных выборках. Регуляризация задачи	109
Михеев И.В., Кондратов Д.В., Виштак О.В. Программная реализация модуля динамического тестирования учебных программ.....	113
Ульзутуев И.Е., Максимов А.А. О свойствах решёток подавтоматов нечётких полуавтоматов и их детерминизаторов	117
Ярская В.Н., Шеляхина Н.В. Специальные социальные сети в интернете с ограничением пользовательского интерфейса	126

ЭНЕРГЕТИКА

Анкудинова М.С., Ларин Е.А., Сандалова Л.А. Методы расчета и учета показателей надежности котла-утилизатора при выборе рациональных схем отопительных ПГУ.....	133
Долотовский И.В., Ларин Е.А., Долотовская Н.В. Структурная и параметрическая оптимизация систем охлаждения установок подготовки и транспортировки природного газа.....	141
Огурцов К.Н., Дунаева Т.Ю. Повышение энергоэффективности СВЧ электротермических установок с камерами лучевого типа путем управления источниками внутреннего тепла в объекте	146

CONTENTS

MATHEMATICS AND MECHANICS

- Zemlyanukhin A.I., Bochkarev A.V.** New exact solutions to the generalized Konno-Kameyama-Sanuki equation 5
- Saltykova O.A., Papkova I.V., Kashubina A.A., Sinichkina A.O., Vetsel S.S., Krysko V.A.** Transition scenarios of the flexible Euler-Bernoulli beams from harmonic to chaotic vibrations under arbitrary transversal loads 9
- Shlyakhov S.M., Krivulina E.F.** Determination of the allowable and limit loads on the porous circular cross-section beam at torsion 17
- Shlyakhov S.M., Krivulina E.F.** Reliability estimation through stability of the component rack using the theory of stationary casual processes 21

PHYSICS

- Kuznetsov A.P., Sedova Yu.V.** Autonomous and coupled models for hyperchaos 26
- Kurchatov I.S., Kustov D.M.** Research into materials for ir lasers of the A^{II}B^{VI} semiconductors with Ni²⁺ ions 32

ENGINEERING AND MACHINE-BUILDING

- Grishanov I.A., Brzhozovsky B.M.** Analysis of the cutting process using the Kalman filter 38
- Zhevalev O.Yu., Prikhodko M.A., Kuts L.E.** A quick-detachable energy-efficient system of radiation heating for diffusion welding 44
- Ivanov V.V., Reshetnikov M.K.** Computer simulation of the cutting waterjet 46
- Ignatyeva S.S., Ignatyev S.A.** Methodology for controlling quality factors in the production of bearings 49
- Ignatyev A.A., Samoylova E.M.** An autocorrelation model for vibroacoustic fluctuations when cutting under the dynamic tool system. Part 1 53
- Klochkova N.N., Obuchova A.B., Protsenko A.N., Bryatov A.S.** Simulation of a special- purpose induction unit using the flux software 57
- Krasilnikov A.Ya., Kravchenko K.Yu.** Maximazation of the cutting parameters in end milling using the asymptotic stability criteria 64
- Perevoznikova Ya.V., Perekryostov A.P., Vavilina N.A.** A mathematical model and a method for defining rating conditions used in diffusion bonding with thermal pressure systems 72
- Sklyarov I.A., Zakharov O.V.** Pilot-scale tests for abrasive blast cleaning units 76
- Sheiko L.I., Prikazchikov S.I.** Basic classification characteristics and classification of multiaxial gear cutting machines 81

INFORMATION TECHNOLOGIES

- Borodenkova I.V., Tsarev V.A.** Simulating the characteristics of the triode part for a powerful multi-beam klystrode-frequency multiplier 85
- Brovko A.V., Pakharev R.S.** A reconstruction method for the inner structure of dielectric materials of the variable form using the artificial neural network 89
- Vasilevskiy V.G.** A probabilistic logical concept 96
- Kostyuk V.P., Kheystver A.A.** Models and methods for research and development of routing public passenger transport 103
- Kulikov V.B.** Reconstruction of probability density functions using model samples and task regularization 110
- Mikheyev I.V., Kondratov D.V., Vishtak O.V.** Software implementation unit complex dynamic testing tested apprenticeship programs 113
- Ulutuev I.E., Maximov A.A.** Software implementation unit complex dynamic testing tested apprenticeship programs 117
- Yarskaya V.N., Shelyakhina N.V.** Social internet networking as a special network with a limited user interface 126

POWER ENGINEERING

- Ankudinova M.S., Larin E.A., Sandalova L.A.** Calculation and accounting method of HRSG reliability measures when selecting sustainable configurations of combined cycle cogeneration power plants 133
- Dolotovskiy I.V., Larin E.A., Dolotovskaya N.V.** Structural and parametric optimization of the cooling systems for preparation and transportation of natural gas 141
- Ogurtsov K.N., Dunaeva T.Yu.** Increasing the energy efficiency of microwave electrothermal appliances with beam-type cameras by controlling internal heat sources 146

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

УДК 517.957:517.938

А.И. Землянухин, А.В. Бочкарев

НОВЫЕ ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ОБОБЩЕННОГО УРАВНЕНИЯ
КОННО – КАМЕЯМЫ – САДУКИ

Проведен анализ эволюционных уравнений, имеющих точные солитоноподобные решения вида $n \cdot \operatorname{arctg} f(\theta)$. Получены новые точные решения такого вида для обобщенного уравнения Конно – Камеямы – Садzuki.

Нелинейная волновая динамика, солитоноподобные решения, обобщенное уравнение Конно – Камеямы – Садzuki

A.I. Zemlyanukhin, A.V. Bochkarev

NEW EXACT SOLUTIONS TO THE GENERALIZED
KONNO-KAMEYAMA-SANUKI EQUATION

The analysis of evolution equations with exact soliton-like solutions of the $n \cdot \operatorname{arctg} f(\theta)$ form is performed. The new exact solutions of this type for the generalized Konno-Kameyama-Sanuki equation are obtained.

Nonlinear wave dynamics, soliton-like solutions, generalized Konno-Kameyama-Sanuki equation

Точное солитоноподобное решение вида

$$u(x,t) = n \operatorname{arctg} f(\theta), \quad (1)$$

где n – четное целое число, $f(\theta)$ – функция бегущей координаты

$$\theta = a(x - Vt), \quad (2)$$

удовлетворяет широкому классу эволюционных уравнений.

Хорошо известно решение классического уравнения синус-Гордона [1]

$$u_{tt} - u_{xx} + \sin u = 0 \quad (3)$$

в форме (1), где $n = 4$, $f(\theta) = e^\theta$, $a = (1 - V^2)^{-1/2}$.

Дисперсионное уравнение синус-Гордона

$$u_{tt} - u_{xx} - \beta u_{xxxx} + \sin u = 0 \quad (4)$$

имеет решение в форме солитонного комплекса вида (1), в котором $n = 8$, $f(\theta) = e^\theta$, а константы a и V являются известными функциями дисперсионного параметра β [2].

В [3] показано, что комбинация уравнений синус-Гордона и модифицированного уравнения Буссинеска

$$u_{tt} - u_{xx} - \gamma u_x^2 u_{xx} - \beta u_{xxxx} = -\sin u, \quad (5)$$

описывающая движение дислокации (краудина) в кристалле с нелинейным взаимодействием между соседними атомами, имеет решение вида (1) с $n = 4$, $f(\theta) = e^\theta$, при выполнении условия

$$\gamma = 3\beta/2 \quad (6)$$

Если (6) не выполняется, уравнение (5) имеет точное решение в форме солитонного комплекса (1), в котором $n = 8$ [4].

Весьма похожей на (5) структурой обладает уравнение Конно – Камеямы – Сануки (ККС) [5]:

$$u_{xt} + \frac{3}{2}\beta u_x^2 u_{xx} + \beta u_{xxxx} - \sin u = 0. \quad (7)$$

В [6] отмечено, что уравнение ККС описывает явление самоиндуцированной прозрачности при распространении оптического импульса в двухкомпонентной среде из двухуровневых атомов. Тем же автором показано [7], что уравнение вида (7) имеет точное решение в форме (1), с $n = 4$, $f(\theta) = e^\theta$.

В [8] приводятся точные решения для одинарного (8), двойного (9) и тройного (10) уравнений синус-Гордона:

$$u_{xt} = \alpha \sin u, \quad (8)$$

$$u_{xt} = \alpha \sin u + \beta \sin 2u, \quad (9)$$

$$u_{xt} = \alpha \sin u + \beta \sin 2u + \gamma \sin 3u. \quad (10)$$

Отмечено, что уравнение (9) находит широкое применение в физике ферромагнитных материалов, жидкокристаллических волн, (10) описывает распространение сверхкоротких резонансных оптических импульсов. Показано [8], что (1) будет решением уравнений (8) – (10) в случае $n = 2$, $f(\theta) = a_0 + a_1 \operatorname{sn} \theta$, где sn – эллиптическая синус-функция Якоби.

Для уравнения (9) также найдено решение вида (1), где $n = 2$, а функция $f(\theta)$ равна $\operatorname{Atg}(B\theta + C)$, $B\theta + C$ или $A \operatorname{th}(B\theta + C)$ в зависимости от соотношения между величинами α и β [9].

В работе [10] для двойного дисперсионного уравнения синус-Гордона

$$u_{tt} - u_{xx} - \beta u_{xxxx} + \sin(u) + 2h \sin\left(\frac{u}{2}\right) = 0 \quad (11)$$

получено решение (1) с $n = 8$, $f(\theta) = e^\theta$. При добавлении в (11) дисперсионного слагаемого в виде шестой производной u_{xxxxx} следует принять в (1) $n = 12$. Более того, точное решение в такой форме существует даже для тройного дисперсионного уравнения синус-Гордона, содержащего шестую производную [10].

Наконец, в [11] показано, что уравнение, составленное из левой части (5) и правой части (9)? допускает точное решение в форме (1), если $n = 4$, $f(\theta) = e^\theta$.

Найдем точные солитоноподобные решения вида (1) для обобщения уравнения ККС с правой частью в виде суммы синусов кратных аргументов:

$$u_{tx} - c_1 u_x^2 u_{xx} + c_2 u_{xxxx} = \sum_{k=1}^N d_k \sin ku. \quad (12)$$

С помощью перехода к новой независимой переменной

$$\theta = B(x - Ct) \quad (13)$$

уравнение (12) приводится к обыкновенному дифференциальному уравнению

$$-B^2 C u_{\theta\theta} - c_1 B^4 u_\theta^2 u_{\theta\theta} + c_2 B^4 u_{\theta\theta\theta\theta} = \sum_{k=1}^N d_k \sin ku. \quad (14)$$

Будем искать его решение в форме

$$u = 2 \operatorname{arctg} \theta. \quad (15)$$

Левая часть уравнения (14) принимает вид

$$L = \frac{1}{(\theta^2 + 1)^4} \sum_{k=1}^3 L_k \theta^{2k-1}, \quad (16)$$

где L_k – постоянные коэффициенты, зависящие от B, C, c_1, c_2 .

Для правой части (14) после преобразования по формулам синусов кратных углов и подстановки (15) имеем

$$R = \frac{1}{(\theta^2 + 1)^N} \sum_{k=1}^N R_k \theta^{2k-1}, \quad (17)$$

где R_k – постоянные коэффициенты, зависящие от d_1, \dots, d_N .

Условие $L = R$ дает систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), связывающих параметры $B, C, d_1, \dots, d_N, c_1, c_2$.

Предположим, что только часть коэффициентов d_i в правой части (14) отлична от нуля. Рассмотрим, каким получается решение при различном выборе этих ненулевых коэффициентов.

Будем искать решение СЛАУ только в случае $c_1 \neq 0, c_2 \neq 0$. Для удобства назовем этот случай и соответствующее ему решение нетривиальными.

Оказывается, любой одиночный ненулевой коэффициент d_i , а также набор $\{d_1, d_2\}$ дают тривиальное решение. Добавление к перечисленным наборам любой комбинации коэффициентов, *старших* d_4 , то есть d_5, d_6 и т.д., также приводит к тривиальному решению. Необходимое условие нетривиального решения – наличие в наборе хотя бы одного из коэффициентов d_3 или d_4 . Добавление к набору, дающему нетривиальное решение, любой комбинации с коэффициентами d_5, d_6 и т.д. не имеет смысла – в ходе решения все коэффициенты, старшие d_4 , обращаются в ноль. Это происходит по причине появления в (17) слагаемых с более высокими степенями θ , чем в (16).

Таким образом, имеются всего 10 вариантов наборов, дающих различные нетривиальные решения: $\{d_1, d_3\}, \{d_2, d_3\}, \{d_1, d_2, d_3\}, \{d_1, d_4\}, \{d_2, d_4\}, \{d_3, d_4\}, \{d_1, d_2, d_4\}, \{d_1, d_3, d_4\}, \{d_2, d_3, d_4\}, \{d_1, d_2, d_3, d_4\}$.

В частности, младшему из этих наборов $\{d_1, d_3\}$ соответствует решение

$$d_1 = \frac{9}{2}c_2B^4, \quad d_3 = -\frac{3}{2}c_2B^4, \quad C = 12c_2B^2, \quad c_1 = -6c_2, \quad (18)$$

$$u = 2 \arctg(B(x - 12c_2B^2t)),$$

в котором имеется условие для коэффициентов c_1, c_2 левой части уравнения (12) и все величины выражены через два свободных параметра c_2 и B .

Набор из 3 коэффициентов $\{d_1, d_2, d_3\}$ дает

$$d_1 = B^2C - \frac{15}{2}c_2B^4, \quad d_2 = \frac{1}{2}B^2C - 6c_2B^4, \quad d_3 = -\frac{3}{2}c_2B^4, \quad c_1 = -6c_2, \quad (19)$$

$$u = 2 \arctg(B(x - Ct)).$$

Набор из 4 коэффициентов $\{d_1, d_2, d_3, d_4\}$ приводит к решению самого общего вида:

$$d_1 = B^2C + \frac{7}{4}c_1B^4 + 3c_2B^4, \quad d_2 = \frac{1}{2}B^2C + \frac{7}{4}c_1B^4 + \frac{9}{2}c_2B^4,$$

$$d_3 = \frac{3}{4}c_1B^4 + 3c_2B^4, \quad d_4 = \frac{1}{8}c_1B^4 + \frac{3}{4}c_2B^4, \quad (20)$$

$$u = 2 \arctg(B(x - Ct)),$$

не содержащему никаких условий для c_1 и c_2 .

Будем искать теперь решение (14) в форме

$$u = 4 \arctg \theta. \quad (21)$$

При условии $N = 2$ структуры обеих частей уравнения (14) сохраняют форму (16) и (17). По вышеуказанной причине все коэффициенты d_k с номерами $k \geq 3$ в ходе решения обращаются в ноль. Любой одиночный ненулевой коэффициент дает тривиальное решение. Поэтому имеется единственный вариант нетривиального решения – для набора $\{d_1, d_2\}$:

$$d_1 = -c_2B^4, \quad d_2 = \frac{1}{2}c_2B^4, \quad C = 4c_2B^2, \quad c_1 = -c_2, \quad (22)$$

$$u = 4 \arctg(B(x - 4c_2B^2t)).$$

Рассмотрим решение (14) в форме

$$u = 2 \arctg(e^\theta). \quad (23)$$

При условии $N = 4$ вид (16) и (17) не меняется, с учетом замены $\theta \rightarrow e^\theta$. Имеются 4 варианта нетривиального решения – для нулевой правой части (12) и трех наборов ненулевых коэффициентов: $\{d_2\}$, $\{d_4\}$, $\{d_2, d_4\}$. Добавление в эти наборы любых других коэффициентов, отличных от d_2 и d_4 , не имеет смысла – все эти коэффициенты в ходе решения обращаются в ноль.

Например, набору $\{d_2\}$ соответствует решение

$$d_2 = \frac{1}{2}c_2B^4 - \frac{1}{2}B^2C, \quad c_1 = -6c_2, \quad u = 2 \arctg(e^{B(x-Ct)}) \quad (24)$$

а набору $\{d_2, d_4\}$ – решение

$$d_2 = -\frac{1}{4}c_1B^4 - c_2B^4 - \frac{1}{2}B^2C, \quad d_4 = \frac{1}{8}c_1B^4 + \frac{3}{4}c_2B^4, \quad u = 2 \arctg(e^{B(x-Ct)}) \quad (25)$$

Поиск решения уравнения (14) в форме

$$u = 4 \arctg(e^\theta) \quad (26)$$

приводит к 4 вариантам нетривиального решения – для нулевой правой части (12) и трех наборов $\{d_1\}$, $\{d_2\}$, $\{d_1, d_2\}$. Добавление в эти наборы любых других коэффициентов, отличных от d_1 и d_2 , лишено смысла – все эти коэффициенты в ходе решения обращаются в ноль.

В частности, набор $\{d_1\}$ дает решение

$$d_1 = c_2B^4 - B^2C, \quad c_1 = -\frac{3}{2}c_2, \quad u = 4 \arctg(e^{B(x-Ct)}) \quad (27)$$

а набор $\{d_1, d_2\}$ – решение

$$d_1 = -2c_1B^4 - 2c_2B^4 - B^2C, \quad d_2 = c_1B^4 + \frac{3}{2}c_2B^4, \quad u = 4 \arctg(e^{B(x-Ct)}) \quad (28)$$

Наконец, подстановка

$$u = 8 \arctg(e^\theta) \quad (29)$$

приводит к единственному варианту нетривиального решения для набора $\{d_1\}$:

$$d_1 = 8c_1B^4 + 3c_2B^4 \quad C = -2B^2(4c_1 + c_2), \quad u = 8 \arctg(e^{B(x+2B^2(4c_1+c_2)t)}) \quad (30)$$

Заметим, что более высокие значения n не позволяют получить новые нетривиальные решения (14).

Таким образом, для обобщенного уравнения Конно – Камеямы – Сануки (12) найдены все варианты точных солитоноподобных решений вида $n \arctg(\theta)$ и $n \arctg(e^\theta)$, для которых коэффициенты левой части этого уравнения отличны от нуля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абловиц С. Солитоны и метод обратной задачи / С. Абловиц, Х. Сигур. М.: Мир, 1987. 480 с.
2. Bogdan M.M. Radiationless motion of one-dimensional solitons in dispersive medium / M.M. Bogdan, A.M. Kosevich // Nonlinear Coherent Structures in Physics and Biology, NATO ASI Series: Physics. 1994. V.329. P. 373-376.
3. Kosevich A.M. The supersonic motion of a crowdion. The one-dimensional model with nonlinear interaction between the nearest neighbours / A.M. Kosevich, A.S. Kovalev // Sol. State Comm. 1973. V. 12. №8. P. 763-765.
4. Charkina O. Internal modes of solitons and near-integrable highly-dispersive nonlinear systems / O. Charkina, M. Bogdan // Symmetry, integrability and geometry: methods and applications. 2006. V. 2. Paper 047.
5. Konno K. Effect of weak dislocation potential on nonlinear wave propagation in anharmonic crystal / K. Konno, W. Kameyama, H. Sanuki // J. Phys. Soc. Japan. 1974. V. 37. № 1. P. 171-176.
6. Сазонов С.В. Эффект самоиндуцированной прозрачности в системе изотопов / С.В. Сазонов // Изв. РАН. Серия физическая. 2007. Т. 71. № 1. С. 121-126.
7. Сазонов С.В. Оптические солитоны в средах из двухуровневых атомов / С.В. Сазонов // Науч.-техн. вестник инф. технологий, механики и оптики. 2013. Вып. 5(87). С. 1-22.
8. Liu S. Exact solutions to sine-Gordon-type equations / S. Liu, Z. Fu, S. Liu // Physics Letters A. 2006. V. 351. P. 59-63.

9. Wang M. Exact solutions to the double Sine-Gordon equation / M. Wang, X. Li // *Chaos, Solitons and Fractals*. 2006. V. 27. P. 477-486.
10. Bogdan M.M. Soliton complex dynamics in strongly dispersive medium / M.M. Bogdan, A.M. Kosevich, G.A. Maugin // *Wave Motion*. 2001. V. 34. P. 1-26.
11. Гендельман О.В. Точные солитоноподобные решения в обобщенных динамических моделях квазиодномерного кристалла / О.В. Гендельман, Л.И. Маневич // *ЖЭТФ*. 1997. Т. 112. Вып. 4(10). С. 1510-1515.

Землянухин Александр Исаевич –
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Прикладная математика
и системный анализ» Саратовского
государственного технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Aleksandr I. Zemlyanukhin –
Dr. Sc., Professor,
Head: Department of Applied Mathematics
and System Analysis
Yuri Gagarin Technical University of Saratov

Бочкарев Андрей Владимирович –
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Прикладная математика и системный анализ»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Andrey V. Bochkarev –
Ph.D., Associate Professor
Department of Applied Mathematics
and System Analysis,
Yuri Gagarin Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.02.15, принята к опубликованию 11.05.15

УДК 539.3

О.А. Салтыкова, И.В. Папкина, А.А. Кашубина, А.О. Синичкина, С.С. Вецель, В.А. Крысько

**К ВОПРОСУ О СЦЕНАРИЯХ ПЕРЕХОДА КОЛЕБАНИЙ ИЗ ГАРМОНИЧЕСКИХ
В ХАОТИЧЕСКИЕ ГИБКИХ БАЛОК ЭЙЛЕРА – БЕРНУЛЛИ
ПРИ ПРОИЗВОЛЬНЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ НАГРУЗКАХ**

Рассматривается нелинейная динамика геометрически нелинейной балки Эйлера – Бернулли, в зависимости от типа знакопеременной нагрузки и от относительной толщины. Выявлены некоторые особенности сценариев перехода от гармонических колебаний к хаотическим.

Балка Эйлера – Бернулли, геометрическая нелинейность, хаос, сценарии перехода колебаний из гармонических в хаотические

O.A. Saltykova, I.V. Papkova, A.A. Kashubina, A.O. Sinichkina, S.S. Vetsel, V.A. Krysko

**TRANSITION SCENARIOS OF THE FLEXIBLE EULER-BERNOULLI BEAMS FROM
HARMONIC TO CHAOTIC VIBRATIONS UNDER ARBITRARY TRANSVERSAL LOADS**

The paper considers nonlinear dynamics of the geometrically nonlinear Euler-Bernoulli beam, depending on the type of the alternating load and the relative thickness. Peculiar features of the scenarios relating the transition from harmonic to chaotic vibrations are obtained.

The Euler – Bernoulli beam, geometric nonlinearity, chaos, the scenarios of transition from harmonic vibrations to chaos

Введение. Балки как самостоятельные элементы или как часть составных конструкций широко используются в авиационной и ракетно-космической технике, судо- и автомобилестроении, энергетическом и химическом машиностроении, жилищном и промышленном строительстве. В конструк-

циях ответственного назначения данные элементы подвергаются различным внешним нагрузкам. Эти конструкции работают в сложном динамическом режиме при различных неблагоприятных погодных воздействиях (снег, дождь, резкие порывы ветра) и широком диапазоне температуры. Как следствие – характер колебаний таких конструкций является сложным и, в общем, стохастическим. Проблема изучения сложных колебаний распределенных структур с учетом различных нелинейностей изучена в [1-8].

Отдельным вопросом изучения динамики механических систем является вопрос о переходе систем в состояние хаоса под действием различного вида нагрузок.

Опишем основные сценарии возникновения динамического хаоса.

1. Через бесконечную последовательность бифуркаций удвоения периода (сценарий Фейгенбаума) [9]. 2. Через разрушение двумерного тора (теорема Афраймовича – Шильникова) или через разрушение замкнутой инвариантной кривой [10]. 3. Через перемежаемость (сценарий Помо – Манневиля), т.е. чередование во времени почти регулярных колебаний с интервалами хаотического поведения, наблюдаемый сразу за порогом возникновения хаоса [11]. 4. По сценарию Рюэля – Такенса – Ньюхауза переход в хаос осуществляется следующим образом: появляется новая линейно-независимая частота и переход к хаосу осуществляется через серию линейных комбинаций линейно-зависимых частот [12].

В работе представлена математическая модель, описывающая колебания балки по гипотезе Эйлера – Бернулли, исследована динамика балки в зависимости от типов нагрузки и граничных условий, а также проведен анализ перехода от гармонических колебаний к хаотическим.

Постановка задачи

Рассматривается балка с прямоугольным поперечным сечением длиной a , высотой $2h$. Как двумерная область Ω балка определяется следующим образом: $\Omega = \{x \in [0, a]; -h \leq z \leq h\}$, $0 \leq t \leq \infty$.

Математическая модель балки Эйлера – Бернулли основывается на следующих гипотезах:

- любое поперечное сечение, нормальное к срединной линии до деформации, остается после деформации прямым и нормальным к срединной линии, вместе с тем высота сечения не изменяется;
- инерция вращения элементов балки не учитывается, однако учитываются силы инерции, отвечающие за перемещения вдоль нормали к срединной линии;
- внешние силы не меняют своего направления при деформации балки;
- продольный размер балки значительно превышает ее поперечные размеры;
- геометрическая нелинейность учитывается в форме Г. Кармана [13].

Система дифференциальных уравнений в перемещениях в безразмерном виде, описывающих движения балки с учетом диссипации энергии, выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{1}{\lambda^2} \left\{ L_2(w, w) + L_1(u, w) - \frac{1}{12} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right\} - \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \varepsilon_1 \frac{\partial w}{\partial t} + q = 0, \\ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + L_3(w, w) - \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0; \end{cases} \quad (1)$$

здесь $L_1(u, w) = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$, $L_2(w, w) = \frac{3}{2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2$, $L_3(w, w) = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial w}{\partial x}$ – нелинейные операторы, черточки над безразмерными параметрами для простоты опущены.

Безразмерные параметры:

$$\begin{aligned} \bar{w} &= \frac{w}{(2h)}, \quad \bar{u} = \frac{ua}{(2h)^2}, \quad \bar{x} = \frac{x}{a}, \quad \lambda = \frac{a}{(2h)}, \quad \bar{q} = q \frac{a^4}{(2h)^4 E}, \\ \bar{t} &= \frac{t}{\tau}, \quad \tau = \frac{a}{k}, \quad k = \sqrt{\frac{Eg}{\gamma}}, \quad \bar{\varepsilon}_1 = \varepsilon_1 \frac{a}{k}. \end{aligned} \quad (2)$$

К уравнениям (1) следует присоединить краевые и начальные условия.

Краевые условия:

1. Консольная балка (схемы $a - в$, табл. 1)

$$w(0, t) = \frac{\partial w(0, t)}{\partial x} = u(0, t) = 0; \quad M_x(a, t) = N_x(a, t) = Q_x(a, t) = 0. \quad (3)$$

2. Заделка-заделка (схема з, табл. 1)

$$w(0,t) = w(a,t) = u(0,t) = u(a,t) = \frac{\partial w(0,t)}{\partial x} = \frac{\partial w(a,t)}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

Начальные условия:

$$\begin{aligned} w(x)|_{t=0} = 0; \quad u(x)|_{t=0} = 0, \\ \frac{\partial w(x)}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0; \quad \frac{\partial u(x)}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Бесконечномерная задача (1)-(5) с помощью метода конечных разностей, с аппроксимацией $O(c^2)$ сводится к конечномерной – системе обыкновенных дифференциальных уравнений. В каждом узле сетки получим следующую систему обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} L_{1,c}(w_i(t), u_i(t)) + q_i(t) = \varepsilon_1 \dot{w}_i(t) + \ddot{w}_i(t); \\ L_{2,c}(w_i(t), u_i(t)) = \varepsilon_2 \dot{u}_i(t) + \ddot{u}_i(t); \quad (i = 0, \dots, n), \end{cases} \quad (6)$$

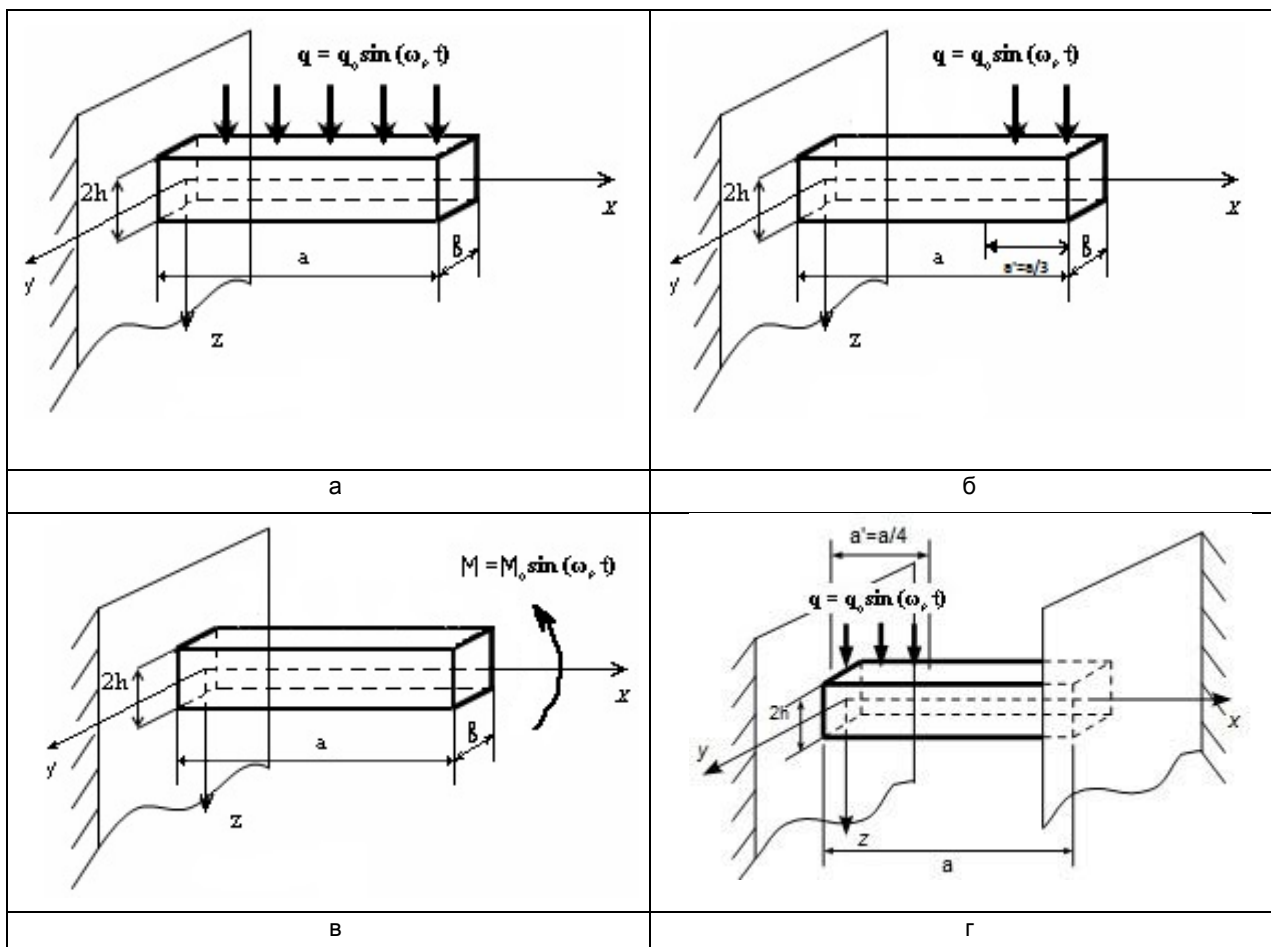
где, n – число разбиений по пространственной координате, c – шаг по пространственной координате, $L_{1,c}(w_i(t), u_i(t))$, $L_{2,c}(w_i(t), u_i(t))$ разностные операторы. Задача Коши решается методом Рунге – Кутты четвертого порядка точности.

Решение осуществляется с помощью методов нелинейной динамики и качественной теории дифференциальных уравнений: строятся сигналы, фазовые портреты, сечения Пуанкаре, Фурье-спектры, автокорреляционные функции, применяются вейвлет-преобразования и анализ знаков показателей Ляпунова.

Приведем схемы, отражающие решаемые в работе задачи.

Таблица 1

Расчетные схемы



Нелинейная динамика консольной балки при некоторых типах нагрузки

Проведем анализ нелинейной динамики консольной балки (схемы а-в табл. 1) в зависимости от трех типов нагружения:

Тип 1. На рассматриваемую балку действует знакопеременная поперечная нагрузка, распределенная на единицу длины, действующая в направлении оси OZ, вида (табл. 1а):

$$q = q_0 \sin(\omega_p t) \tag{7}$$

Тип 2. Нагрузка $q = q(x,t)$ (7) действует на треть длины консольной балки, со стороны не закрепленного края балки (табл. 1б).

Тип 3. К незакрепленному краю балки приложен момент вида (табл. 1в):

$$M = M_0 \sin(\omega_p t) \tag{8}$$

Задача решается со следующими значениями управляющих параметров: $\lambda = 50$, $\omega_p = 5.1$, $\varepsilon_1 = 1$, шаг по пространственной координате $n = 40$, шаг по времени Δt выбирался из условий устойчивости получаемых решений по принципу Рунге $\Delta t = 3.90625 \cdot 10^{-3}$.

Для первого типа нагрузки (таблица 1, а) приведем сценарий перехода к хаосу.

Таблица 2

Сценарий перехода колебаний от гармонических к хаотическим

q_0	Частоты			
10	Гармонические колебания на частоте $\omega_p = 5.1$.			
35	$\omega_p = 5.1, \omega_1 = 2.74$	Двухчастотные колебания		
49	$\omega_2 = 2\omega_1 - \omega_p = \frac{\omega_1}{7} = \frac{\omega_p}{13} = 0.39$	Колебания системы происходят на двух независимых частотах, с последующей серией линейно зависимых от них частот.		
186	$\omega_3 = \omega_2 \cdot 9 = \omega_1 + 2\omega_2 = \frac{\omega_p}{13} \cdot 9 = 3.53$			
576	$\omega_4 = \omega_1 - 2\omega_2 = \omega_2 \cdot 5 = 1.95$			
793,75	$\omega_5 = \omega_4 - 2\omega_2 = 3\omega_2 = \omega_1 - 4\omega_2 = 1.19$			
1171	$\omega_6 = \omega_3 + 2\omega_2 = \omega_1 + 4\omega_2 = 4.32$			
1212	$\omega_7 = 2\omega_2 = 0.79$ и $\omega_8 = 6\omega_2 = 2.34$			
2253.3	Для данной нагрузки ниже представлены графики			
Спектр мощности $S(\omega)$		Сигнал $w(0.5, t)$	Фазовый портрет $w(\dot{w})$	Сечение Пуанкаре $w_i (w_{i+T})$
Система находится в состоянии хаоса. На спектре мощности наблюдается большое количество частот, фазовый портрет приобретает нерегулярную форму, сечение Пуанкаре представлено множеством точек				

Описанный переход соответствует классическому сценарию Рюэля – Такенса – Ньюхауза, который описан в [4].

Далее остановимся на сценарии перехода из гармонических в хаотические для второго типа нагружения (табл. 1б).

Таблица 3

Сценарий перехода колебаний от гармонических к хаотическим

q_0	Частоты		
10-1000	Гармонические колебания на частоте $\omega_p = 5.1$.		
2000	$\omega_p = 5.1, \omega_1 = 0.39$	Двухчастотные колебания и серия линейно зависимых частот	
3000-10000	$\omega_2 = 2.73, \omega_3 = 3.53, \omega_4 = 4.3,$ $\omega_5 = 1.17, \omega_6 = 1.95$		
48000	При данной нагрузке на спектре мощности Фурье наблюдается зашумление. На 2D вейвлет спектре независимая частота $\omega_1 = 0.39$ со временем исчезает. Происходит изменение сигнала и фазового портрета.		
Сигнал $w(0.5, t)$	Спектр мощности $S(\omega)$	Фазовый портрет в пространстве (w, \dot{w}, \ddot{w})	2D вейвлет-спектр Морле

Сценарий перехода системы от гармонических к хаотическим колебаниям соответствует классическому сценарию Рюэля – Такенса – Ньюхауза.

Далее приведем сценарий для третьего типа нагружения консольной балки (табл. 1в).

Таблица 4

Сценарий перехода колебаний от гармонических к хаотическим

q_0	Частоты		
0,5	Гармонические колебания на частоте $\omega_p = 5.1$		
0,825	$\omega_p = 5.1, \omega_1 = 0.39$	Двухчастотные колебания	
0,83	$\omega_p = 5.1, \omega_1 = 0.39, \omega_2 = 2.73$	Происходит бифуркация удвоения периода, т.е. первая бифуркация Хопфа, в результате появляется частота $\omega_2 = 2.73$	
10	$\omega_p = 5.1, \omega_1 = 0.39, \omega_2 = 2.73$ $\omega_3 = 3.53$	Двухчастотные колебания и серия линейно зависимых частот	
25	$\omega_p = 5.1, \omega_1 = 0.39, \omega_2 = 2.73, \omega_3 = 3.53$ $\omega_4 = 1.17$		
25-70	$\omega_p = 5.1, \omega_3 = 3.6$		
90	$\omega_p = 5.1, \omega_3 = 3.6, \omega_5 = 2.1$		
100	$\omega_p = 5.1, \omega_3 = 3.6, \omega_5 = 2.1, \omega_6 = 0.6$		
105	Утроение периода колебаний. Графики представлены ниже		
Сигнал $w(0.5, t)$	Спектр мощности $S(\omega)$	Фазовый портрет в пространстве (w, \dot{w}, \ddot{w})	2D вейвлет-спектр Морле

Таким образом, последний сценарий принципиально отличается от первых двух. При малых амплитудах внешних вынуждающих колебаний появляющиеся частоты полностью совпадают с частотами для первого и второго сценария (табл. 2, 3). Но необходимо отметить бифуркацию удвоения периода, которой нет в первом и втором сценарии. В дальнейшем линейно зависимые частоты исчезают, и появляются новые, не присутствующие в других сценариях.

Сравнение поведения системы при различных типах нагружения позволяет говорить о значительном влиянии типа нагрузки на динамику консольной балки. Несмотря на то, что сценарии перехода для каждого типа нагружения одинаковы и соответствуют классическому сценарию Рюэля – Такенса – Ньюхауза, сценарии имеют отличительные особенности.

Наиболее неустойчивой является система с приложенной к свободному краю знакопеременной нагрузкой (второй сценарий). Балка выдерживает амплитуду внешнего воздействия на порядки больше, чем для второго и третьего типа нагружения.

В каждом рассмотренном сценарии присутствует частота $\omega = 0,39$.

Сценарии перехода к хаосу для всех трех типов нагружения можно классифицировать как классический сценарий Рюэля – Такенса – Ньюхауза.

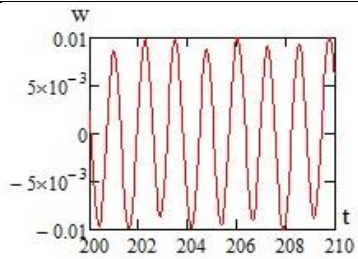
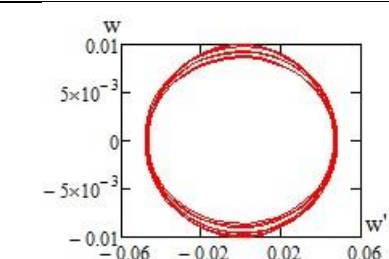
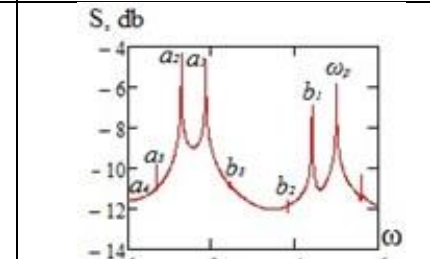
Нелинейная динамика балки в зависимости от геометрического параметра λ

Далее приведем результаты исследования сценариев перехода к хаосу колебаний балки с учетом граничных условий (4), в зависимости от λ . Рассматривается динамика балки с учётом локальной нагрузки q_0 . Количество разбиений балки по длине $n=40$, локальная нагрузка приложена на левый край (таблица 1, г) и занимает 10 узлов, коэффициент демпфирования для прогиба $\mathcal{E}=1$, а частота вынуждающих колебаний $\omega_p = 5,1$.

Табл. 5 построена при $\lambda = a/2h = 30$ – отношение длины балки a к её высоте $2h$.

Таблица 5

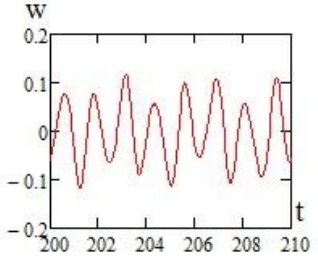
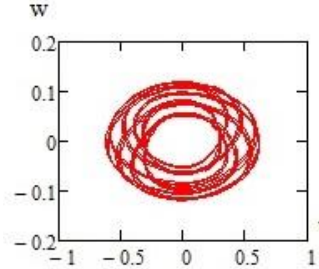
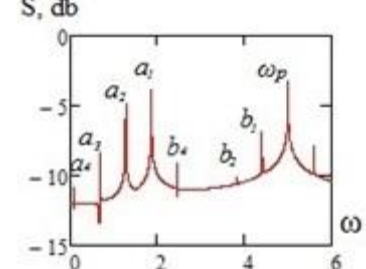
Сценарий перехода колебаний от гармонических к хаотическим

q_0	Частоты		
50	$\omega_p = 5,1, a_1 = 1,86.$	Двухчастотные колебания.	
100	$\omega_p = 5,1, a_1 = 1,86, a_2 = 1,27 = \frac{1}{4}\omega_p.$	Двухчастотные колебания и появление серии линейно-зависимых частот.	
500	$b_1 = 4,4179, a_1 - a_2 = \omega_p - b_1.$		
500-1500	$a_1 - a_2 = \omega_p - b_1 \approx 0,58.$		
1500	$a_3 = 0,68 = 7,5\omega_p, a_4 = 0,09, b_2 = 3,83, b_3 = 2,45,$ при этом $\omega_p - b_1 = b_1 - b_2 = b_3 - a_1 = a_1 - a_2 =$ $a_2 - a_3 = a_3 - a_4 \approx 0,58.$		
Сигнал $w(t)$		Фазовый портрет $w(\dot{w})$	Спектр мощности S, db
			

Переход в хаос происходит по классическому сценарию Рюэля – Такенса – Ньюхауза [14]. Следующий численный эксперимент проводился при $\lambda = 50$.

Таблица 6

Сценарий перехода колебаний от гармонических к хаотическим

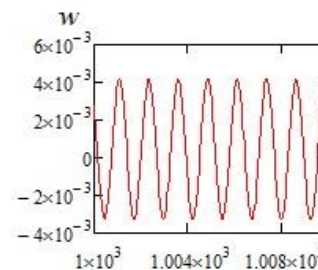
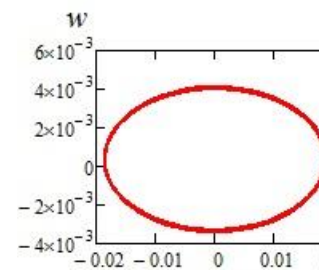
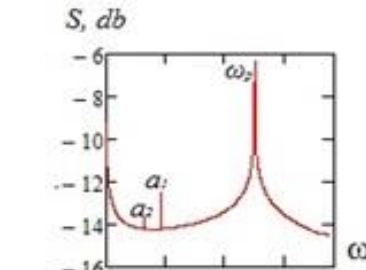
q_0	Частоты			
50-100	Гармонические колебания на частоте $\omega_p = 5,1$			
500	$\omega_p = 5,1, a_1 = 1,85, a_2 = 1,27 = \frac{1}{4}\omega_p$	Двухчастотные колебания и серия линейно-зависимых частот		
10000	$\omega_p = 5,1, a_1 = 1,85, a_2 = 1,27 = \frac{1}{4}\omega_p, b_1 = 4,4.$ $a_1 - a_2 = \omega_p - b_1$			
15000	$a_4 = 0,08, a_3 = a_4 + K = 0,67, b_2 = a_4 + 6K = 3,81, b_4 = a_4 + 4K = 2,46. K = a_1 - a_2 = a_2 - a_3 = a_3 - a_4 = b_2 - a_1 = \omega_p - b_1 = b_1 - b_2 \approx 0,59$			
Сигнал $w(t)$			Фазовый портрет $w(\dot{w})$	Спектр мощности S, db
				

Таким образом, переход в хаос осуществляется через появление двух независимых частот с последующей серией зависимых частот (сценарий Рюэля – Такенса – Ньюхауза [14]).

Далее проанализируем сценарий перехода от гармонических колебаний к хаотическим колебаниям при $\lambda = 100$.

Таблица 7

Сценарий перехода колебаний от гармонических к хаотическим

q_0	Частоты			
50-100	Гармонические колебания на частоте $\omega_p = 5,1$			
500	$\omega_p = 5,1, a_1 = 1,87.$	Двухчастотные колебания и серия линейно-зависимых частот		
5000-22000	$\omega_p = 5,1, a_1 = 1,87, a_2 = 1,27 = \frac{1}{4}\omega_p.$ Графики представлены ниже			
Сигнал $w(t)$			Фазовый портрет $w(\dot{w})$	Спектр мощности S, db
				

Из трёх полученных результатов, записанных в табл. 5-7, видим, что чем меньше отношение длины к толщине λ балки, тем быстрее система переходит в состояние хаоса. Можно отметить, что при $\lambda = 30$ система переходит в хаос при $q_0 = 5000$, а при $\lambda = 50$ при $q_0 = 22000$. При $\lambda = 100$ увеличение нагрузки не приводит систему в состояние хаоса. Частоты a_1 и a_2 постоянны при всех значениях λ . При $\lambda = 30$ и $\lambda = 50$ сценарии перехода системы в хаос одинаковы и соответствуют сценарию Рюэля – Такенса – Ньюхауза.

Основываясь на приведенных выше исследованиях перехода колебаний балки от гармонических в хаотические, можно сделать следующие выводы:

1. Переход колебаний механической системы в хаос существенно зависит от граничных условий, типа нагружения и относительной толщины.

2. Сделано обобщение критериев перехода колебаний из гармонических в хаотические, а именно: переход в хаос для механических систем характеризуется появлением двухчастотных независимых колебаний с последующим появлением серии зависимых частот – сценарий Рюэля – Такенса – Ньюхауза.

3. Для двух типов граничных условий выявлены частоты, присутствующие в каждом сценарии, не зависимо от типа нагрузки и геометрических параметров балки.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ МОЛ-А-2014 № 14-01-31335

ЛИТЕРАТУРА

1. Awrejcewicz J. Nonclassic Thermoelastic Problem in Nonlinear Dynamics of Shells / J. Awrejcewicz, V.A. Krysko. Springer – Verlag, Berlin, New York, London, Paris, Tokyo. 2003. 430 p.
2. Awrejcewicz J. Nonlinear Dynamics of Continuous Elastic Systems / J. Awrejcewicz, V.A. Krysko, A.F. Vakakis. Springer – Verlag, Berlin, New York, London, Paris, Tokyo, 2004. 356 p.
3. Awrejcewicz J. CRC Series: Modern Mechanics and Mathematics. Introduction to asymptotic methods / J. Awrejcewicz, V.A. Krysko. Chapman&Hall/SRC London, New York, 2006. 251 p.
4. Awrejcewicz J. Chaos in Structural Mechanics / Jan Awrejcewicz, Vadim A. Krysko. Springer, 2008. 424 p.
5. Chaotic nonlinear dynamics of cantilever beams under the action of signs-variables loads / A.V. Krysko, M.I. Koch, T.V. Yakovleva, U. Nackendorst, V.A. Krysko // PAMM, Special Issue: 82nd Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics (GAMM), Graz, 2011, Vol. 11. Issue 1. P. 327-328.
6. Chaotic synchronization of vibrations of a coupled mechanical system consisting of a plate and beams / J. Awrejcewicz, A.V. Krysko, T.V. Yakovleva, D.S. Zelenchuk, V.A. Krysko // Latin American Journal of Solids and Structures. 10 (2013). P. 161-172.
7. Яковлева Т.В. Контактное взаимодействие пластины и локально расположенной балки / Т.В. Яковлева, О.А. Салтыкова, В.А. Крысько // Актуальные вопросы науки: материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. Москва, 25.04.2014. М., 2014.
8. Антоненко Э.В. Математические модели потери устойчивости неоднородных цилиндрических оболочек от неравномерной радиальной нагрузки / Э.В. Антоненко, Т.Э. Шульга // Изв. Саратов. ун-та. Нов. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2009. Т. 9. Вып. 3. С. 79-83.
9. Feigenbaum M.J. Quantitative Universality for a Class of Nonlinear Transformations / M. J. Feigenbaum // J. Stat. Phys. 1978. Vol. 19. № 25. P. 61-84.
10. Hopf E. A. Mathematical example displaying the features of turbulence / E. A. Hopf // Comm. Pure Appl. Math. 1948. Vol. 1. P. 303-322.
11. Pomean Y. Intermittent transition to turbulence in dissipative dynamical systems / Y. Pomean, P. Manneville // Comm. Math. Phys. 1980. Vol. 74. № 2. P. 189-197.
12. Newhouse. Occurrence of Strange Attractors near Quasiperiodic Flow in T^m , $m \leq 3$ / Newhouse, D. Ruelle, F. Takens // Commun. Math. Phys. 1978. Vol. 64. № 1. P. 35-40.
13. Вольмир А.С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек / А.С. Вольмир. М.: Наука, 1972. 492 с.
14. Шустер Г. Детерминированный хаос / Г. Шустер. М.: Мир, 1988. 240 с.

Салтыкова Ольга Александровна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Математика и моделирование» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Olga A. Saltykova – Ph.D., Associate Professor Department of Mathematics and Modeling Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Папкина Ирина Вячеславовна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Математика и моделирование» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Irina V. Papkova – Ph.D., Associate Professor
Department of Mathematics and Modeling,
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Кашубина Анастасия Андреевна – магистр кафедры «Математика и моделирование» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Anastasiya A. Kashubina – Master student
Department of Mathematics and Modeling,
Yuri Gagarin Technical University of Saratov

Синичкина Анастасия Олеговна – аспирант кафедры «Математика и моделирование» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Anastasiya O. Sinichkina – Postgraduate
Department of Mathematics and Modeling,
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Вецель Сергей Сергеевич – аспирант Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergei S. Vetsel – Postgraduate
Department of Mathematics and Modeling,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Крысько Вадим Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Математика и моделирование» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vadim A. Krysko – Dr. Sc., Professor
Head: Department of Mathematics and Modeling,
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Статья поступила в редакцию 17.12.14, принята к опубликованию 11.05.15

УДК 539.3

С.М. Шляхов, Э.Ф. Кривулина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСКАЕМОЙ И ПРЕДЕЛЬНОЙ НАГРУЗОК НА БРУС КРУГЛОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ИЗ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА ПРИ КРУЧЕНИИ

Представлено решение задачи кручения круглого бруса пористой структуры с переменной по радиусу пористостью. При аппроксимации диаграммы сдвига диаграммой Прандтля получено значение момента начала текучести и предельного момента.

Вал, кручение, пористость

S.M. Shlyakhov, E.F. Krivulina

DETERMINATION OF THE ALLOWABLE AND LIMIT LOADS ON THE POROUS CIRCULAR CROSS-SECTION BEAM AT TORSION

The presented solution to the torsion of the shaft characterized for the porous structure and a variable along the porosity radius. Under approximation of the shift dia-

gram by the Prandtl diagram we received the value of the yield load and the torsional yield.

Shaft, torsion, porosity

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние бруса круглого поперечного сечения пористой структуры под действием крутящего момента M (рис. 1).

В [] рассмотрена задача рационального распределения пористости по сечению бруса круглого поперечного сечения при кручении. Отмечено, что рациональным будет распределение пористости максимальной в центре и убывающей к периферии. В сечении бруса не допускалось появление пластических деформаций.

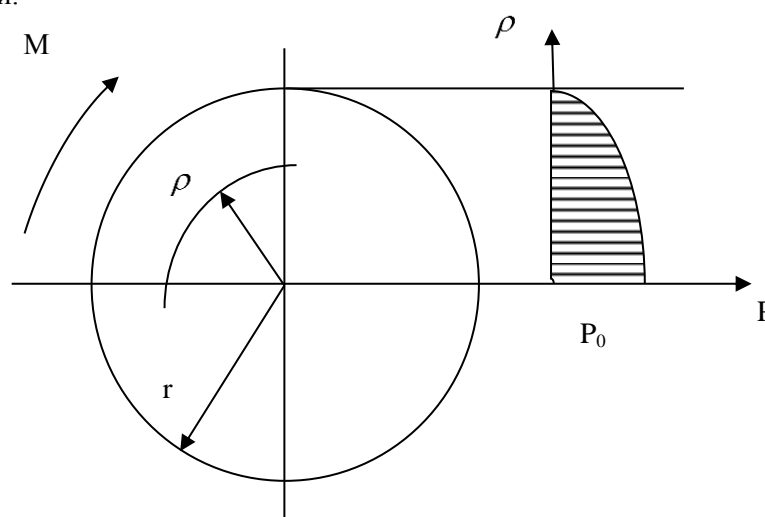


Рис. 1. Распределение пористости по сечению

В настоящей статье получено решение задачи по определению допускаемой и предельной нагрузок в брус при заданном распределении пористости.

Переменную по радиусу пористость аппроксимируем квадратной параболой (1)

$$P = P_0 \left(1 - \left(\frac{\rho}{r} \right)^2 \right) \quad (1)$$

Материал бруса – пористое железо. На основе экспериментальных данных [2, 3] модуль сдвига $G(P)$ и предел текучести материала при сдвиге $\tau_T(P)$ аппроксимируем полиномами

$$\begin{aligned} G(P) &= a_1 + a_2 P + a_3 P^2, \\ \tau_T(P) &= c_1 + c_2 P + c_3 P^2 \end{aligned} \quad (2)$$

со следующими значениями коэффициентов:

$$a_1 = 0,805 \cdot 10^5 \text{ МПа}, \quad a_2 = -1,737 \cdot 10^5 \text{ МПа}, \quad a_3 = 0,359 \cdot 10^5 \text{ МПа},$$

$$c_1 = 113,24 \text{ МПа}, \quad c_2 = -376,25 \text{ МПа}, \quad c_3 = 375,23 \text{ МПа}.$$

Согласно (1) и (2) модуль сдвига и предел текучести изменяются по радиусу сечения по законам

$$\begin{aligned} G(\rho) &= a_1 + a_2 P_0 \left(1 - \left(\frac{\rho}{r} \right)^2 \right) + a_3 P_0^2 \left(1 - \left(\frac{\rho}{r} \right)^2 \right)^2, \\ \tau_T(\rho) &= c_1 + c_2 P_0 \left(1 - \left(\frac{\rho}{r} \right)^2 \right) + c_3 P_0^2 \left(1 - \left(\frac{\rho}{r} \right)^2 \right)^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Примем за диаграмму деформирования диаграмму Прандтля. Выразим угол сдвига, соответствующий началу текучести из соотношения

$$\gamma_T(\rho) = \frac{\tau_T(\rho)}{G(\rho)}. \quad (4)$$

После подстановки (3) в (4) получим функцию

$$\gamma_T(\rho) = \frac{c_1 + c_2 P_0 \left(1 - \left(\frac{\rho}{r}\right)^2\right) + c_3 P_0^2 \left(1 - \left(\frac{\rho}{r}\right)^2\right)^2}{a_1 + a_2 P_0 \left(1 - \left(\frac{\rho}{r}\right)^2\right) + a_3 P_0^2 \left(1 - \left(\frac{\rho}{r}\right)^2\right)^2}. \quad (5)$$

Максимальное значение $\gamma_T(\max)$ функции (5) определит ρ_T и точки сечения, с которых начинается текучесть и позволит найти соответствующий крутящий момент.

Полагая справедливой гипотезу плоских сечений, найдем значение относительного угла закручивания сечения бруса, при котором возникают пластические деформации

$$\theta_T = \frac{\tau_{T(\rho=\rho_T)}}{G(\rho_T)\rho_T} \quad (6)$$

Момент начала текучести в сечении бруса при этом определим по формуле

$$M_T = 2\pi\theta_T \int_0^r G(\rho)\rho^3 d\rho \quad (7)$$

Подставляя (6) в (7) и выполняя интегрирование, получим

$$M_T = 2\pi\theta_T \left\{ r^4 \left[\frac{a_1}{4} + \frac{a_2 P_0}{12} - \frac{a_3 P_0^2}{24} \right] \right\}. \quad (8)$$

Определим закон распределения касательных напряжений по радиусу к моменту начала текучести

$$\tau(\rho) = G(\rho)\theta_T\rho = \theta_T\rho \left\{ a_1 + a_2 P_0 \left(1 - \left(\frac{\rho}{r}\right)^2\right) + a_3 P_0^2 \left(1 - \left(\frac{\rho}{r}\right)^2\right)^2 \right\}. \quad (9)$$

Величина момента M_T допустима, так как не приводит к потере несущей способности бруса. Для определения предельного момента исходим из условия достижения τ_T в каждой точке сечения

$$M_{i0} = 2\pi \int_0^r \tau_T(\rho)\rho^2 d\rho \quad (10)$$

Подставляя (3) в (10) и выполняя интегрирование, получаем

$$M_{i0} = 2\pi r^3 \left\{ \frac{c_1}{3} + \frac{2c_2 P_0}{15} + \frac{8c_3 P_0^2}{105} \right\}. \quad (11)$$

Пример расчета. Рассмотрим кручение бруса со следующими параметрами: $r = 5 \cdot 10^{-2}$ м, $P_0 = 0,4$.

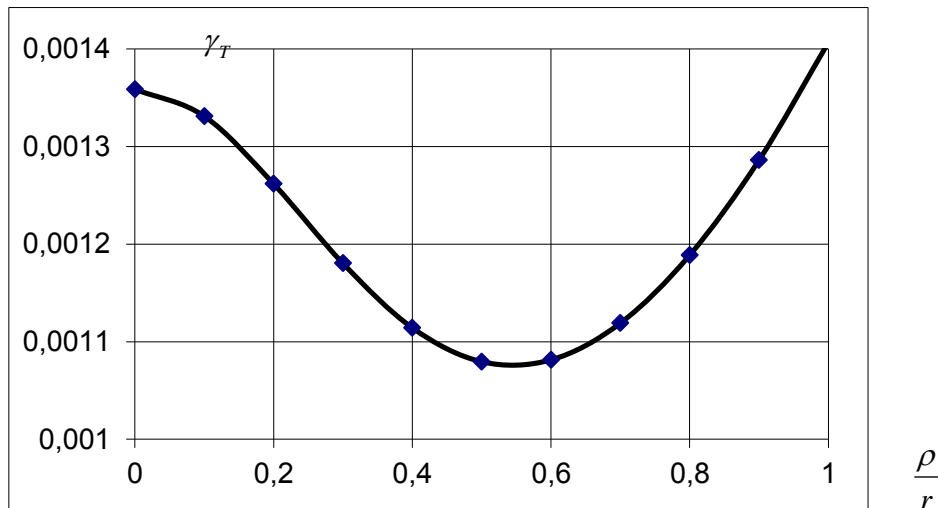


Рис. 2. Угол сдвига начала текучести

На рис. 2 отражен закон изменения угловой деформации текучести γ_T по радиусу сечения. Относительный угол закручивания $\theta_T = 0,028134$ 1/м. Радиус, соответствующий началу текучести, равен $\rho_T = r = 5 \cdot 10^{-2}$ м.

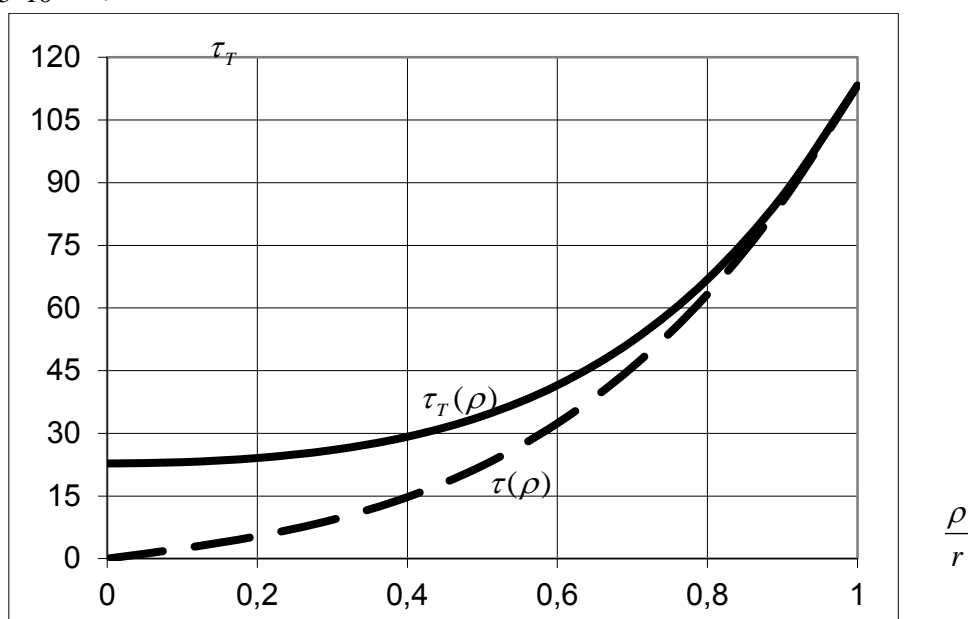


Рис. 3. Распределение напряжений по сечению бруса

Крутящий момент начала текучести равен $M_T = 0,0156MH \cdot м$.

На рис. 3 представлено распределение пределов текучести по радиусу, а также касательных напряжений по сечению бруса при $M = M_T$. В точках сечения при $\rho = \rho_T = r$ напряжения τ и τ_T совпадают.

Кривая $\tau_T(\rho)$ на рис. 3 представляет собой эпюру касательных напряжений в сечении бруса в предельном состоянии.

Значение предельного момента M_{np} равно $M_{np} = 0,0175MH \cdot м$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шляхов С.М. О рациональном распределении пористости при кручении бруса круглого поперечного сечения / С.М. Шляхов, Д.Ю. Гаврилов // European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences: Proceedings of the 1st International scientific conference (February 17, 2014). «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH. Vienna, 2014. С. 137-142
2. Кашталян Ю.А. Характеристики упругих материалов при высоких температурах / Ю.А. Кашталян. Киев: Наук. думка, 1970. 112 с.
3. Белов С.В. Пористые металлы в машиностроении / С.В. Белов. М.: Машиностроение, 1981. 247 с.

Шляхов Станислав Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Теория сооружений и строительных конструкций» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Stanislav M. Shlyakhov – Dr. Sc., Professor
Department Theory of Structures and Construction Designs,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Кривулина Эльвира Федоровна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теория сооружений и строительных конструкций» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Elvira F. Krivulina – Ph.D., Associate Professor
Department of the Theory and Construction Designs,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20.10.14, принята к опубликованию 11.05.15

С.М. Шляхов, Э.Ф. Кривулина

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ПО УСТОЙЧИВОСТИ СОСТАВНОЙ СТОЙКИ В РАМКАХ ТЕОРИИ СТАЦИОНАРНЫХ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Представлено решение задачи об оценке надежности по устойчивости составной стойки в рамках теории стационарных случайных процессов. В решении задачи использован энергетический метод.

Стойка, устойчивость, надежность

S.M. Shlyakhov, E.F. Krivulina

RELIABILITY ESTIMATION THROUGH STABILITY OF THE COMPONENT RACK USING THE THEORY OF STATIONARY CASUAL PROCESSES

The paper presents a solution to the problem related with estimation of reliability through stability of the component rack in terms of the theory of stationary casual processes. The energy method was applied to find the solution to the problem.

Rack, stability, reliability

Пусть P – обобщенная нагрузка, являющая собой случайный нормальный стационарный процесс.

В этом случае мерой надежности является вероятность того, что ни разу за срок службы T действующая нагрузка P не превысит критической, то есть надежность по устойчивости будет равна [1]

$$H = \exp \left[- \int_0^T \int_0^\infty \dot{P} f \left(P_{kr}, \frac{\dot{P}}{t} \right) d\dot{P} dt \right]. \quad (1)$$

Для нормального стационарного процесса $P(t)$ выражение (1) примет вид

$$H = \exp \left[- \frac{T\sigma_P}{2\pi\sigma_P} \exp \left(- \frac{(P_{kr} - m_P)^2}{2\sigma_P^2} \right) \right]. \quad (2)$$

Зададим корреляционную функцию в виде

$$K_P(\tau) = \sigma_P^2 e^{-\alpha_0|\tau|} \left(\cos \beta_0\tau + \frac{\alpha_0}{\beta_0} \sin \beta_0|\tau| \right), \quad (3)$$

где α , β – эмпирические коэффициенты.

На основании (3) выражение (2) примет вид

$$H = \exp \left\{ - \frac{T\sqrt{\alpha_0^2 + \beta_0^2}}{2\pi} \exp \left[- \frac{(P_{kr} - m_P)^2}{2\sigma_P^2} \right] \right\} \quad (4)$$

Решая задачу устойчивости и определяя критическую нагрузку P_{kr} , на основании (4) определяем искомую надежность. Условием обеспеченности надежности будет

$$H \geq H_{norm},$$

где H_{norm} – нормативная надежность для заданного типа конструкций.

Рассмотрим сжатую стойку, защемленную снизу и нагруженную продольной силой P (рис. 1).

Составная решетчатая стойка образована из двух ветвей (поясов), соединенных между собой посредством диагоналей и распорок.

Диагональ образует с распоркой угол α . Длина отдельной панели мала по сравнению с общей длиной стойки, т.е. $b \ll l$.

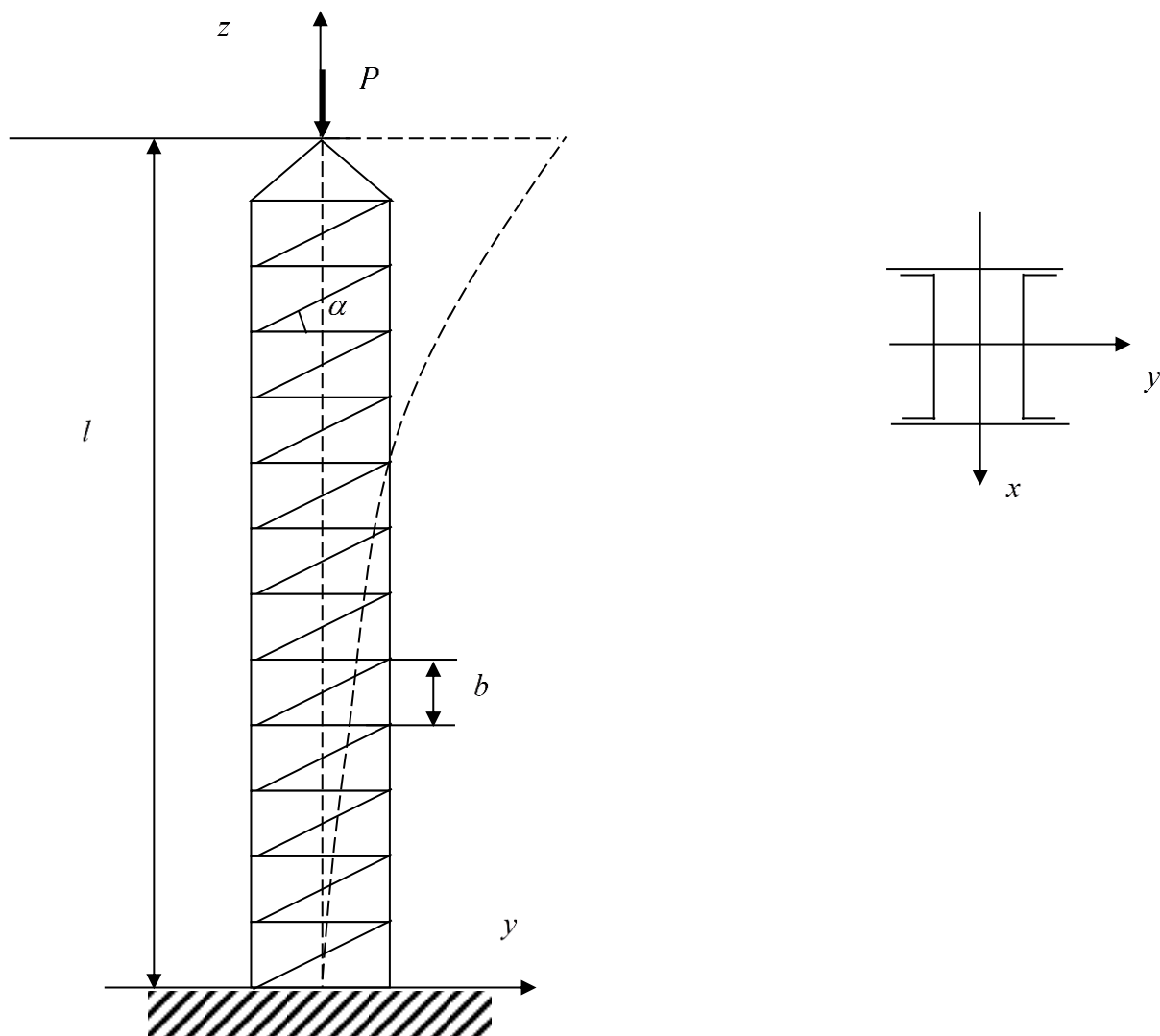


Рис. 1. Конструктивная схема стойки

Для определения критической силы используем энергетический метод [2].

Рассмотрим потерю устойчивости стойки в плоскости YOZ , полагая $I_y > I_x$. Аппроксимируем уравнение упругой линии стойки после потери устойчивости однопараметрическим выражением вида (рис. 2)

$$u = a(1 - \cos \frac{\pi z}{2l}), \quad (5)$$

Изгибающий момент в произвольном z сечении будет равен

$$M_{изг} = P(a - u) = Pa \cos \frac{\pi z}{2l}. \quad (6)$$

Поперечная сила в сечении z по абсолютной величине будет равна

$$Q = \frac{dM_{изг}}{dz} = \frac{Pa\pi}{2l} \sin \frac{\pi z}{2l}, \quad (7)$$

Примем допущение о шарнирном соединении элементов решетки (диагоналей и распорок) с поясами. Тогда приращение потенциальной энергии составного стержня при искривлении его оси складывается из энергии изгиба поясов U_1 , сжатия распорок U_2 и растяжения диагоналей U_3 .

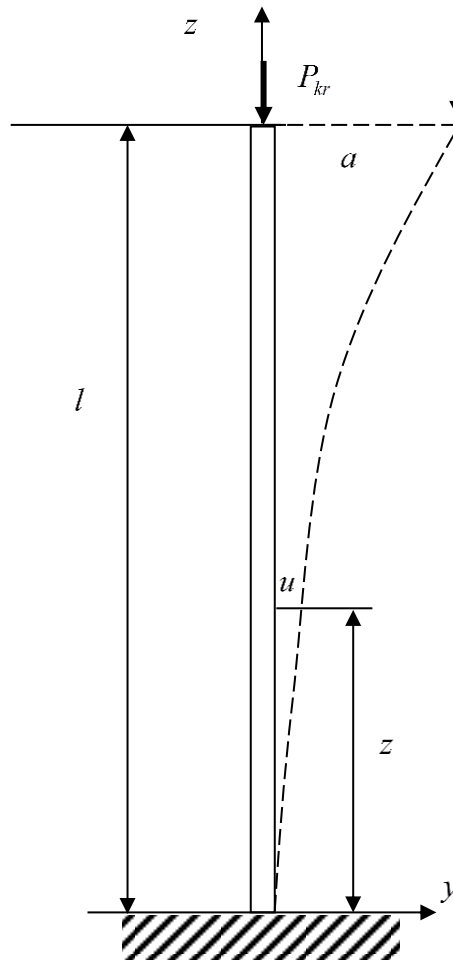


Рис. 2. Схема потери устойчивости

Потенциальная энергия изгиба поясов представляется интегралом

$$U_1 = \frac{1}{2EI_x} \int_0^l M_{изг}^2 dz.$$

На основании (6) для U_1 получим

$$U_1 = \frac{P^2 a^2 l}{4EI_x}. \quad (8)$$

Здесь I_x – момент инерции обоих поясов относительно центральной оси, перпендикулярной к плоскости решетки. При вычислении потенциальной энергии сжатия распорок принимаем, что поперечная сила Q полностью воспринимается распорками решетки, т.е. $N_2 = Q$. Тогда растягивающее усилие N_3 в диагоналях решетки будет равно

$$N_3 = \frac{Q}{\cos \alpha}.$$

Потенциальная энергия деформации распорок

$$U_2 = \sum_1^n \frac{N_2^2 l_2}{2EF_2} = \sum_1^n \frac{Q^2}{2EF_2} \cdot \frac{b}{\operatorname{tg} \alpha},$$

где n – число панелей, F_2 – площадь поперечного сечения обеих распорок, l_2 – длина распорок.

При большом числе панелей, т.е. при условии $b \ll l$, потенциальная энергия сжатия распорок может быть вычислена через интеграл

$$U_2 = \frac{1}{2EF_2 \operatorname{tg} \alpha} \int_0^l Q^2 dz = \frac{\pi^2 P^2 a^2}{16lEF_2 \operatorname{tg} \alpha}. \quad (9)$$

Потенциальная энергия растяжения диагоналей равна

$$U_3 = \sum_1^n \frac{N_3^2 l_3}{2EF_3} = \sum_1^n \frac{Q^2}{2EF_3} \cdot \frac{b}{\cos^2 \alpha \sin \alpha},$$

где l_3 – длина диагонали.

При достаточно большом n получим

$$U_3 = \frac{1}{2EF_3 \cos^2 \alpha \sin \alpha} \int_0^l Q^2 dz = \frac{\pi^2 P^2 a^2}{16lEF_3 \cos^2 \alpha \sin \alpha}. \quad (10)$$

Здесь F_3 – площадь поперечного сечения обеих диагоналей.

Работа внешней силы P при искривлении стойки равна

$$U_P = P \cdot \frac{1}{2} \int_0^l \left(\frac{dU}{dz} \right)^2 dz = \frac{\pi^2 P^2 a^2}{16l}. \quad (11)$$

Из равенства $U_P = U_1 + U_2 + U_3$ определяем критическое значение нагрузки

$$P_{kr} = \frac{\pi^2 EI_x}{(\mu l)^2}, \quad (12)$$

где коэффициент приведенной длины μ равен

$$\mu = \sqrt{4 + \frac{\pi^2 I_x}{l^2} \left[\frac{1}{F_2 \operatorname{tg} \alpha} + \frac{1}{F_3 \sin \alpha \cos^2 \alpha} \right]}. \quad (13)$$

В качестве примера рассмотрим стойку со следующими параметрами: сечение – два швеллера № 30, расстояние между стенками 10 см, длина поясов $l = 10$ м, угол наклона диагоналей $\alpha = 45^\circ$, диагонали и распорки выполнены из уголков $5 \times 5 \times 0,5$ см.

Параметры вероятностного процесса: $\alpha_0 = 0,3 \frac{1}{c}$, $\beta_0 = 0,4 \frac{1}{c}$, $T = 10$ лет = $315 \cdot 10^6 c$, $H_{norm} = 0,99$.

Рабочая нагрузка: $m_p = 250$ кН, $\sigma_p = 20$ кН.

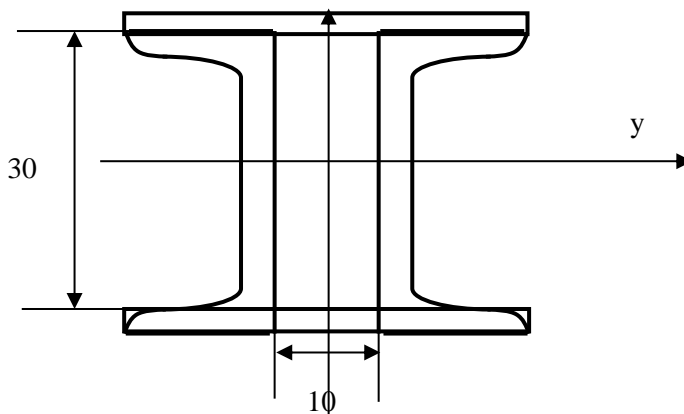


Рис. 3. Схема поперечного сечения стойки

Используя ГОСТ 8509-86, определяем геометрические характеристики сечения. Осевой момент инерции двух поясов равен $I_x = 8786,43 \text{ см}^4$, площадь поперечного сечения двух распорок (диагоналей) равна $F = 9,6 \text{ см}^2$.

Подставляя исходные данные в формулу (13), получаем $\mu = 2,0086$. Соответственно критическая сила для стойки будет равна

$$P_{kr} = 429,876 \text{ кН}.$$

Детерминистический коэффициент запаса устойчивости будет равен

$$n_y = \frac{P_{kr}}{P} = \frac{P_{kr}}{m_p} = \frac{429,876}{250} = 1,72.$$

Определяем надежность стойки по формуле (4)

$$H = \exp \left\{ - \frac{315 \cdot 10^6 \cdot 0,5}{2 \cdot 3,14} \exp \left[- \frac{(429,876 - 250)^2}{2 \cdot 20^2} \right] \right\} = 1.$$

Полученная надежность $H = 1 > H_{norm} = 0,99$, т.е. в течение всего срока эксплуатации потери устойчивости не произойдет.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арасланов А.М. Расчет элементов конструкций заданной надежности при случайных воздействиях / А.М. Арасланов. М.: Машиностроение, 1987. 128 с.
2. Пономарев С.Д. Расчеты на прочность в машиностроении / С.Д. Пономарев. М. Машгиз, 1959. Т. 3. 1118 с.

Шляхов Станислав Михайлович –
доктор физико-математических наук, профессор
кафедры «Теория сооружений и строительных
конструкций» Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.

Stanislav M. Shlyakhov –
Dr. Sc., Professor
Department Theory of Structures
and Construction Designs
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Кривулина Эльвира Федоровна –
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Теория сооружений и строительных
конструкций» Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.

Elvira F. Krivulina –
Ph.D., Associate Professor
Department Theory of Structures
and Construction Designs,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20.10.14, принята к опубликованию 11.05.15

ФИЗИКА

УДК 517.9

А.П. Кузнецов, Ю.В. Седова

АВТОНОМНАЯ И СВЯЗАННАЯ МОДЕЛИ, ДЕМОНСТРИРУЮЩИЕ ГИПЕРХАОС

Рассмотрена динамическая система с четырехмерным фазовым пространством, являющаяся обобщением системы Лоренца. С помощью построения карты ляпуновских показателей выявлены области хаоса и гиперхаоса, а также автономной квазипериодичности. Рассмотрена картина режимов двух связанных систем, отвечающая взаимодействию квазипериодических подсистем и гиперхаотических подсистем.

Гиперхаос, квазипериодические колебания, показатели Ляпунова, ляпуновская карта

А.Р. Kuznetsov, Yu.V. Sedova

AUTONOMOUS AND COUPLED MODELS FOR HYPERCHAOS

We consider a dynamical system presenting the generalization of the Lorenz system with four-dimensional phase space. By computation of the chart for the Lyapunov exponents, the regions of chaos, hyperchaos and autonomous quasiperiodicity were revealed. We investigated the picture of regimes of two coupled systems corresponding to the interaction of quasiperiodic and hyperchaotic subsystems.

Hyperchaos, quasiperiodic oscillations, Lyapunov exponents, chart of Lyapunov exponents

Введение. Гиперхаотический аттрактор – это аттрактор, особенностью которого является наличие более одного положительного показателя Ляпунова, что указывает на растяжение аттрактора в нескольких направлениях. Высокоразмерные гиперхаотические модели перспективны в целях скрытой коммуникации, так как в них по сравнению с обычными хаотическими системами заложены более высокая непредсказуемость и «случайность». В то время как синхронизация систем с классическим хаосом хорошо изучена [1], задача о взаимодействии гиперхаотических систем представляет определенный интерес.

Автономная система. Обратимся к модели, сравнительно недавно предложенной китайскими исследователями [2] и представляющей собой модифицированную форму известной системы Лоренца:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= a(y - x) + euz, \\ \dot{y} &= cx - dxz + y + u, \\ \dot{z} &= xy - bz, \\ \dot{u} &= -ku.\end{aligned}\tag{1}$$

Здесь x, y, z, u – переменные, a, b, c, d, e, k – управляющие параметры.

Модель (1) имеет несколько основных свойств и достоинств [2]:

- 1) она диссипативна при условии $(a + b - 1) > 0$;
- 2) уравнения (1) симметричны относительно оси z : $(x, y, z, u) \rightarrow (-x, -y, z, -u)$;

3) модель имеет только тривиальное (нулевое) состояние равновесия.

При фиксированных значениях параметров $a = 35, c = 25, d = 5, e = 35$ в [2] проведен однопараметрический анализ (1) при некоторых фиксированных b и k . На рис. 1 воспроизведен спектр ляпуновских показателей и характерные фазовые портреты для $k = 100$ в зависимости от параметра b . Численные результаты получены с использованием метода Рунге-Кутты 4-го порядка с шагом интегрирования, равным 0.001. Отметим, что как обычно, один показатель всегда равен нулю $\Lambda_3 = 0$, и на рисунке не показан.

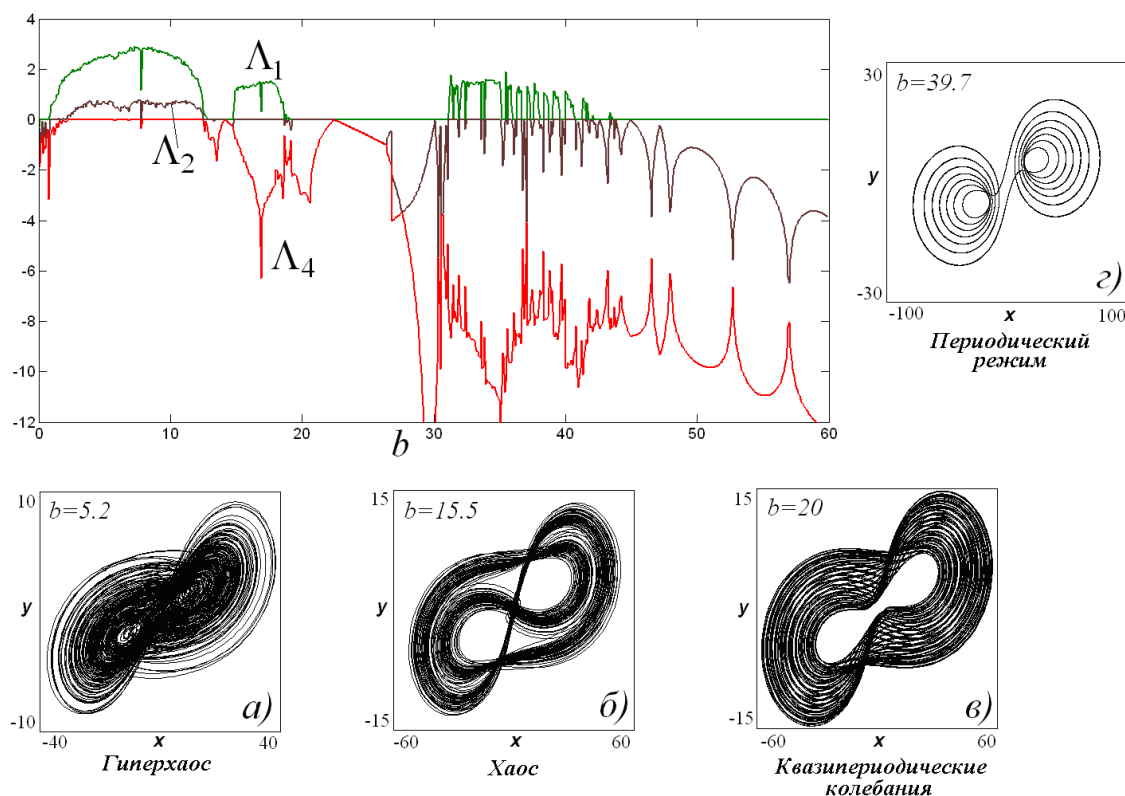


Рис. 1. Ляпуновские показатели модели (1) в зависимости от параметра b для $k = 100$ (ляпуновский показатель $\Lambda_3 = 0$ на графике не указан)

Система (1) демонстрирует гиперхаос в большом интервале значений параметров. Интересно, что наряду с таким режимом, а также периодическими и хаотическими режимами, в системе имеются и квазипериодическая динамика. Таким образом, это еще один пример автономной системы с квазипериодичностью (см. также [3, 4]), что повышает ее ценность.

Однопараметрический анализ не дает полную информацию о типичности режимов и областей их локализации. Поэтому целесообразно обратиться к двухпараметрическому анализу. Для этого используем построение карты ляпуновских показателей [5] и карты динамических режимов [6]. В первом случае проследим за изменением ляпуновских показателей в каждой точке плоскости (k, b) и раскрасим плоскость параметров по следующему правилу¹:

- периодический режим P (все показатели отрицательные);
- квазипериодический режим T_2 (один показатель нулевой);
- хаос C (один показатель положительный);
- гиперхаос HC (два положительных показателя).

Соответствующая ляпуновская карта показана на рис. 2а. Из рисунка видно, что область гиперхаоса целиком занимает обширную часть плоскости управляющих параметров. Очень хорошо визуализируется область существования двухчастотных торов, а также граница области квазипериодичности – линия бифуркации Неймарка-Сакера с отходящими от нее языками Арнольда.

¹Один всегда нулевой показатель отброшен.

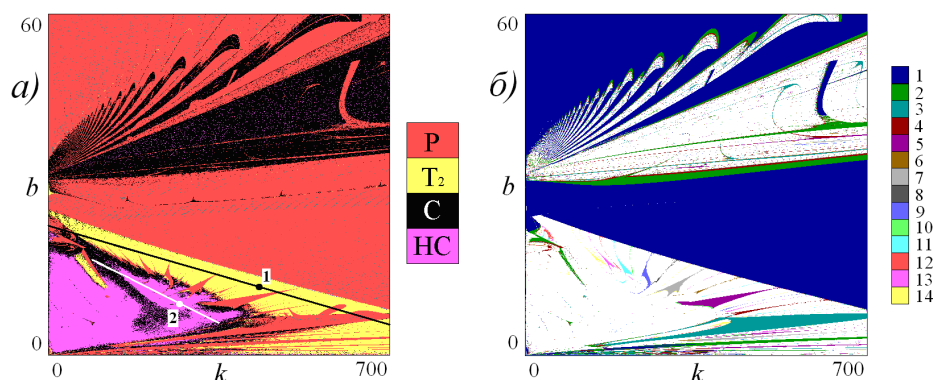


Рис. 2. Двухпараметрический анализ модели (1). а) Карта ляпуновских показателей. Цвет отвечает типу режима. Показаны две линии, для которых выполнено сканирование плоскости параметров б) Карта динамических режимов. Цвет отвечает периоду цикла в сечении Пуанкаре

О характере периодических режимов позволяет судить карта динамических режимов, представленная на рис. 2б. В этом случае при сканировании каждой точки карты устойчивый режим колебаний анализируется с помощью численного построения сечения Пуанкаре [6]. Период режима определяется как количество точек пересечения фазовой траектории с секущей плоскостью. Таким образом, простому предельному циклу отвечает период 1, двухоборотному – период 2 и т.д. В соответствии с этим каждая точка плоскости окрашивается в свой цвет. Основные периоды режимов, определенные в сечении Пуанкаре, указаны цифрами справа на рис. 2б. Непериодические режимы (включая квазипериодическую динамику и хаос) показаны белым цветом.

Таким образом, в системе (1) с единственным тривиальным состоянием равновесия имеются: бифуркация Неймарка – Сакера, двухчастотная автономная квазипериодическая динамика, система языков Арнольда, хаос и гиперхаос. Это позволит рассмотреть далее два случая: взаимодействие систем с автономной квазипериодичностью и взаимодействие систем с гиперхаосом. (Как мы отмечали, взаимодействие хаотических подсистем достаточно полно исследовано).

Связанные системы. Исследуем динамику двух моделей (1), связанных через разность соответствующих переменных:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= a(y_1 - x_1) + ey_1z_1 + \mu(x_2 - x_1), \\
 \dot{y}_1 &= cx_1 - dx_1z_1 + y_1 + u_1 + \mu(y_2 - y_1), \\
 \dot{z}_1 &= x_1y_1 - b_1z_1 + \mu(z_2 - z_1), \\
 \dot{u}_1 &= -k_1y_1 + \mu(u_2 - u_1), \\
 \dot{x}_2 &= a(y_2 - x_2) + ey_2z_2 + \mu(x_1 - x_2), \\
 \dot{y}_2 &= cx_2 - dx_2z_2 + y_2 + u_2 + \mu(y_1 - y_2), \\
 \dot{z}_2 &= x_2y_2 - b_2z_2 + \mu(z_1 - z_2), \\
 \dot{u}_2 &= -k_2y_2 + \mu(u_1 - u_2).
 \end{aligned} \tag{2}$$

Здесь x_1, y_1, z_1, u_1 и x_2, y_2, z_2, u_2 – динамические переменные первой и второй подсистем соответственно, μ – коэффициент связи. Фиксируем, как и в [2], набор параметров $a = 35, c = 25, d = 5, e = 35$, и будем варьировать коэффициенты k_1, k_2, b_1, b_2 .

Наличие системы языков Арнольда разных периодов в автономной системе позволяет приписать модели «частотный параметр», отвечающий движению вдоль линии бифуркации Неймарка – Сакера. Эта линия может проходить через область квазипериодических режимов со встроенной системой языков Арнольда (маршрут 1 на рис. 2 а) и через область гиперхаоса (маршрут 2).

Эти маршруты будут отвечать вариации частотного параметра во второй подсистеме. В первой же подсистеме фиксируем знамения k_1, b_1 так, чтобы для нее соответственно наблюдалась квазипериодичность или гиперхаос. Значения этих параметров отмечены точками на линиях на рис. 2а.

Первый сценарий. Фиксируем в первой подсистеме $k_1 = 430, b_1 = 12$ и строим карту ляпуновских показателей. При этом вдоль оси ординат откладываем величину связи μ . Вдоль оси абсцисс отложим значение k_2 , отсчитываемое вдоль выделенной линии 1 на рис. 2а. Этот случай, очевидно, отвечает взаимодействию квазипериодических колебаний. Полученная ляпуновская карта показана

на рис. 3. Отметим, что теперь появляется дополнительная возможность существования трехчастотных торов T_3 (два нулевых показателя) и четырехчастотных торов T_4 (три нулевых показателя).

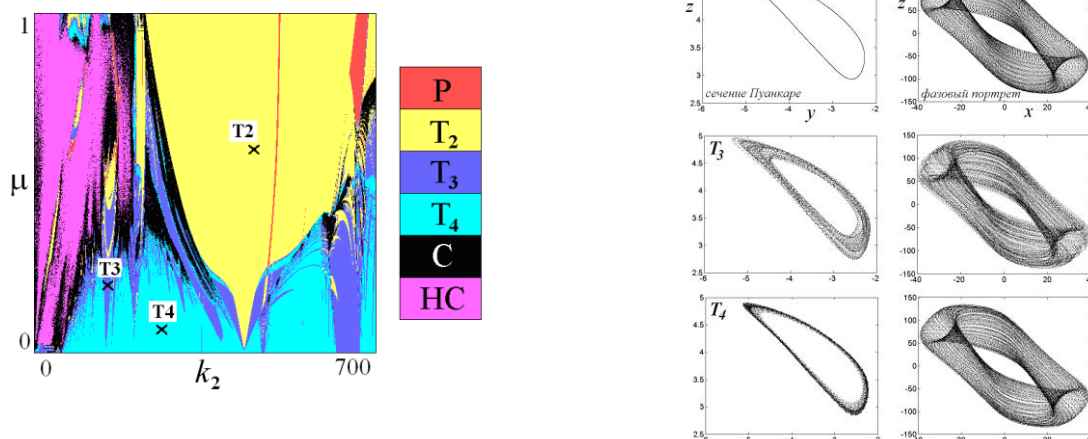


Рис. 3. Карта ляпуновских показателей модели (2), $a = 35, c = 25, d = 5, e = 35, k_1 = 430, b_1 = 12$
 Параметры k_2, b_2 меняются вдоль маршрута 1 на рис. 2а. Справа – сечения Пуанкаре
 и фазовые портреты в выделенных точках на ляпуновской карте

При малой величине связи для модели (2) естественно ожидать возникновения четырехчастотного тора, что подтверждает численное исследование. На карте выделяется также обширная область двухчастотных торов, имеющая форму остроконечного языка, касающегося линии нулевой связи. Точка «контакта» отвечает условию $k_2 = k_1, b_2 = b_1$, когда системы являются идентичными и их «частотные параметры» совпадают. Также наблюдаются узкие языки T_3 -торов, погруженные в область T_4 -торов. На рис. 3 справа показаны фазовые портреты и сечения Пуанкаре в точках существования T_2, T_3 и T_4 торов. Наблюдаются также очень узкие полосы периодических режимов.

Отметим, что внутри области двухчастотных торов возможна фазовая синхронизация – своего рода *синхронная квазипериодичность*. Иллюстрации такого режима даны на рис. 4. Показаны фазовые портреты обеих парциальных систем модели (2), для которых возможно определить фазу колебаний (рис. 4а, б). Рис. 4в представляет собой зависимость разности фаз $\varphi_1 - \varphi_2$ от времени t ; фазы вычислены по формуле $\varphi_1 = \arctan(y_1/x_1), \varphi_2 = \arctan(y_2/x_2)$. Видно, что разность $\varphi_1 - \varphi_2$ изменяется во времени в ограниченном интервале, что говорит о фазовой синхронизации. Еще одним доказательством существования фазовой синхронизации является специфический вид фазовой диаграммы на рис. 4г. На рис. 4д можно видеть зависимость амплитуд первой и второй подсистемы R_1 и R_2 от времени.

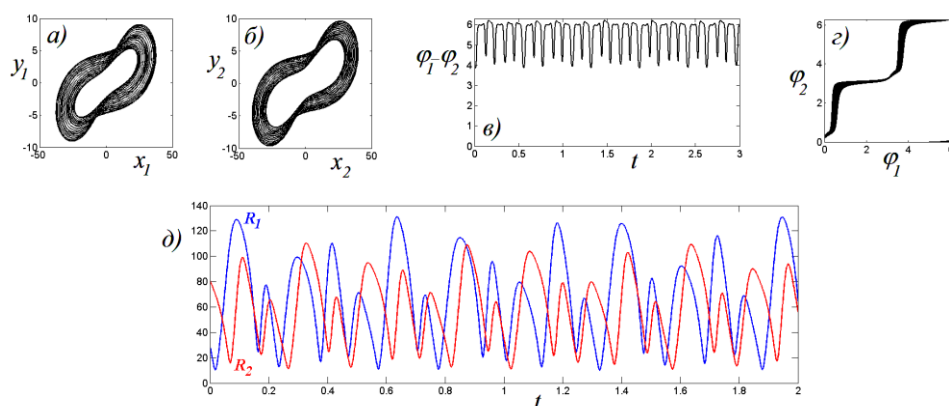


Рис. 4. Иллюстрация синхронной квазипериодичности на базе двухчастотных колебаний
 внутри области T_2 ; $k_2 = 320, \mu = 0.7$. а, б – фазовые портреты с хорошо определенной фазой
 для обеих подсистем модели (2), в – зависимость разности фаз от времени,
 г – фазовая диаграмма, д – зависимость амплитуд подсистем от времени

Второй сценарий. Рассмотрим теперь случай, когда в первой подсистеме наблюдается гиперхаос, чему на рис. 2а отвечает точка на линии белого цвета. Во второй подсистеме изменяем параметры вдоль маршрута 1. Таким образом, это задача о взаимодействии гиперхаоса с квазипериодичностью. На карте рис. 5 можно видеть, что доминирует гиперхаос с двумя положительными показателями Ляпунова; однако при увеличении связи возникает достаточно обширная область двухчастотной квазипериодичности.

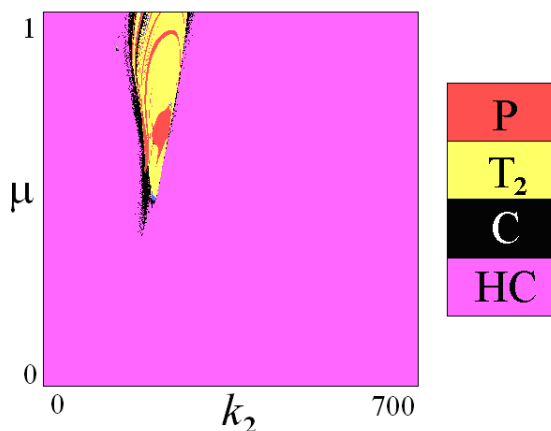


Рис. 5. Карта ляпуновских показателей для модели (2), $a = 35, c = 25, d = 5, e = 35, k_1 = 430, b_1 = 12$. Параметры k_2, b_2 меняются вдоль маршрута 1 на рис. 2а. Справа от рисунка введены обозначения HC_3 и HC_4 – режимы гиперхаоса с тремя и четырьмя положительными ляпуновскими показателями

Третий сценарий. Теперь во второй подсистеме варьируем параметры вдоль маршрута 2 на рис. 2а, причем первая парциальная система генерирует гиперхаотические колебания, чему отвечает точка на этой линии. Таким образом, это задача о взаимодействии подсистем с гиперхаосом. Поскольку обе подсистемы имеют в своем ляпуновском спектре по два положительных показателя, логично ожидать на ляпуновской карте наличие области с четырьмя положительными показателями Ляпунова. Это подтверждает рис. 6, на котором обозначены режимы с двумя, тремя и четырьмя положительными ляпуновскими показателями. Замечательно, однако, что при большой связи не только понижается число положительных ляпуновских показателей, но возникают (хотя и очень узкие) области двухчастотной квазипериодичности. Таким образом, взаимодействие гиперхаотических подсистем может приводить к квазипериодичности.

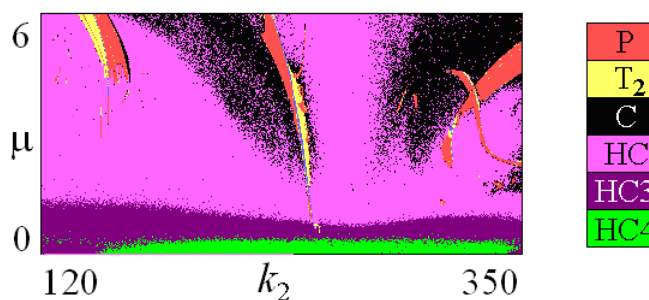


Рис. 6. Карта ляпуновских показателей для модели (2), $a = 35, c = 25, d = 5, e = 35, k_1 = 270, b_1 = 9$. Параметры k_2, b_2 меняются вдоль маршрута 2 на рис. 2а. Справа от рисунка введены обозначения HC_3 и HC_4 - режимы гиперхаоса с тремя и четырьмя положительными ляпуновскими показателями

Рис. 7 представляет собой график первых четырех ляпуновских показателей в случае, когда мы движемся по линии $k_2 = const$. Интересным моментом является заметное изменение изрезанности графиков по сравнению с рис. 1. Таким образом, возникающий при взаимодействии подсистем гиперхаос является достаточно *грубым*, т.е. слабо зависящим от параметров. Это может быть важным для приложений.

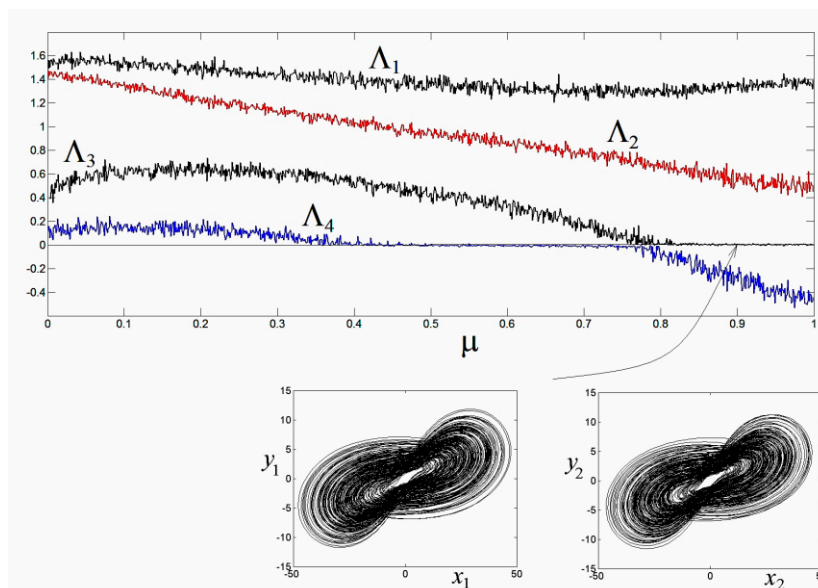


Рис. 7. График старших ляпуновских показателей, получающийся при движении вдоль прямой $k_2 = 285$ на рис. 6. Показаны фазовые портреты при $\mu = 0.9$

Заключение. В работе рассмотрены задачи о взаимодействии подсистем, которые в автономном режиме могут демонстрировать квазипериодичность и гиперхаос. Для связанных подсистем с автономной квазипериодичностью обнаружен режим синхронной квазипериодичности. Одним из интересных результатов является возникновение квазипериодических колебаний для взаимодействующих гиперхаотических систем.

Работа поддержана грантом Президента РФ поддержки ведущих научных школ НШ-1726.2014.2 и РФФИ (проект 14-02-00085).

ЛИТЕРАТУРА

1. Пиковский А. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление / А. Пиковский, М. Розенблум, Ю. Куртс. М.: Техносфера, 2003. 496 с.
2. Chen Z. A novel hyperchaos system only with one equilibrium / Z. Chen, Y. Yang, G. Qi, Z. Yuan // *Physics Letters A*. 2007. Vol. 360. P. 696-701.
3. Кузнецов А.П. Автономный генератор квазипериодических колебаний. / А.П. Кузнецов, С.П. Кузнецов, Н.В. Станкевич // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*. Т. 18. 2010. № 2. С. 51-61.
4. Анищенко В.С. Генератор квазипериодических колебаний. Бифуркация удвоения двумерного тора / В.С. Анищенко, С.М. Николаев // *Письма в ЖТФ*. Т. 31. 2005. №. 19. С. 88-94.
5. Метод карт ляпуновских показателей: Иллюстрации в теории связанных автоколебательных систем / В.М. Дорошенко, Ю.П. Емельянова, А.П. Кузнецов, Ю.В. Седова // *Вестник СГТУ*. 2014. № 1 (74). С. 12-22.
6. Кузнецов С.П. Динамический хаос / С.П. Кузнецов. М.: Физматлит, 2006. 356 с.

Кузнецов Александр Петрович – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Саратовского филиала Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН

Седова Юлия Викторовна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Саратовского филиала Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН

Aleksandr P. Kuznetsov – Dr. Sc., Professor, Leading Researcher: Kotel'nikov's Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (Saratov Branch)

Yulia V. Sedova – Ph.D., Senior Researcher: Kotel'nikov's Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (Saratov Branch)

И.С. Курчатов, Д.М. Кустов

**ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИК ЛАЗЕРОВ
НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ А^{II}В^{VI}, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ Ni²⁺**

Исследованы спектральные закономерности энергетической структуры иона Ni²⁺ в полупроводниковых материалах ZnO, ZnS, ZnSe, ZnTe, CdO, CdS, CdSe, CdTe и соотношение этих структур с шириной запрещенной зоны. Оцениваются возможности получения лазерного эффекта на этих материалах в диапазоне 1.5-3 микрона.

Полупроводниковые лазеры, ионы группы железа, энергетическая структура, интенсивности переходов

I.S. Kurchatov, D.M. Kustov

**RESEARCH INTO MATERIALS FOR IR LASERS
OF THE A^{II}B^{VI} SEMICONDUCTORS WITH Ni²⁺ IONS**

The paper deals with a research into the spectral properties of Ni²⁺ ion energy structure in the semiconductor materials ZnO, ZnS, ZnSe, ZnTe, CdO, CdS, CdSe, CdTe and the ratio of these structures with bandgap related materials. The possibility of obtaining laser action for these materials within the range of 1.5-3 microns is evaluated.

Semiconductor lasers, ions of the iron group, the energy structure, the intensity of transitions

Введение. Полупроводниковые лазеры применяются в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС), технологиях формообразования, резки и сварки различных материалов, медицине для диагностики и лечения различных заболеваний, системах военного назначения, научных исследованиях, измерительной технике и др. [1]. Лазеры этого типа имеют большой диапазон генерируемой мощности в непрерывном и импульсном режимах, большое быстродействие при импульсной модуляции, частота излучения может перестраиваться в пределах области люминесценции. По сравнению с другими типами лазеров они имеют меньшие вес и габариты и наибольший коэффициент полезного действия. Одно из самых больших применений полупроводниковые лазеры находят в волоконно-оптических линиях связи. Известно, что полоса прозрачности ВОЛС в диапазоне длин волн (1,5-3) мкм значительно шире спектров передаваемых сигналов.

По этой причине для повышения экономической эффективности построенных и новых ВОЛС перспективно применение передачи сигналов на новых, ещё не использованных частотах. Видимо, по этой причине в последние годы возник интерес к исследованиям по созданию лазеров на полупроводниках А^{II}В^{VI} и А^{III}В^V, легированных ионами Cr²⁺, Co²⁺, Ni²⁺ и Fe²⁺ и редкоземельных элементов. Теоретические и экспериментальные исследования в этом направлении выполнялись на отдельном типе полупроводника, легированного одним из ионов [2-7]. С появлением общей теории лигандной структуры окружения ионов группы железа (Co²⁺, Ni²⁺ и Fe²⁺) [8-11] появилась возможность рассчитать весь набор параметров областей люминесценции ионов группы железа в полупроводниках А^{II}В^{VI}. Целью нашей работы является расчёт параметров массива областей люминесценции в ионах Co²⁺, Ni²⁺ и Fe²⁺, введённых в полупроводники А^{II}В^{VI} в диапазоне длин волн (1,5-3) мкм, и сравнение результатов расчёта с результатами экспериментальных исследований других авторов. Результаты расчёта параметров областей люминесценции для ионов Co приведены в [12, 13]. В настоящей статье проведены результаты для Ni²⁺ в полупроводниках А^{II}В^{VI}.

Расчет параметров полос люминесценции

Расчет выполняется в два этапа: вначале рассчитываются значения энергетических уровней для свободного иона, а затем решается подзадача расчета изменений энергетической структуры иона при его нахождении в поле окружения лигандов материала лазера определенной симметрии.

Определение параметра Dq

Параметр Dq в ионной модели кристалла определяется следующим образом:

$$Dq = k \frac{Z_L r_{3d}^4}{R_{AL}^5}, \quad (1)$$

где Z_L – заряд лигандов В, r_{3d}^4 – радиус 3d оболочки иона Ni^{2+} , R_{AL} – расстояние между атомами А и L=B в кристаллической решетке $A^{II}B^{VI}$, k – координационное число окружения иона, для Ni^{2+} $k=4$.

В [12] на основании экспериментальных значений параметра Dq в материалах $A^{II}B^{VI}$ была определена зависимость заряда лигандов $Z_L = \frac{R_{AL}^5}{k r_{3d}^4} Dq$ от межионного расстояния в этих материалах.

На основании этих расчетов были посчитаны по формуле (1) значения параметров Dq , В, С для Ni с использованием радиуса оболочки Ni $r_{3d}(Ni^{2+}) = 64$ Пм. Они получены параметризацией зависимости, построенной в [12] по данным в [14] и приведены в табл. 1.

Таблица 1

Спектроскопические параметры иона Ni^{2+} в полупроводниковых кристаллах
ZnO, ZnS, ZnSe, ZnTe, CdO, CdS, CdSe, CdTe*

L (ligand)	R_{AL} (Zn-L) Пм	R_{AL} (Cd-L) Пм	Dq (ZnL) см-1	Dq (CdL) см-1	B (ZnL) см-1	B (CdL) см-1	C (ZnL) см-1	C (CdL) см-1	Z_L (ZnL)	Z_L (CdL)
O	204		523		664		2989		0.155	
S	233		474		567		2551		0.287	
Se	247		450		520		2340		0.358	
Te	266		418		456		2053		0.479	
O		221		494		607		2732		0,213
S		250		445		510		2295		0,342
Se		264		421		463		2083		0,437
Te		283		389		399		1797		0,600

* $R(Zn-L)$, $R(Cd-L)$ – сумма ковалентных радиусов цинка, кадмия и атомов лигандов L, $Dq(ZnL)$, $Dq(CdL)$ – параметр потенциала кристаллического поля кубической симметрии ($см^{-1}$); $B(ZnL)$, $B(CdL)$, $C(ZnL)$, $C(CdL)$ – параметры электростатического взаимодействия атома кобальта в соответствующих кристаллах; $Z_L(Zn)$, $Z_L(Cd)$ – числа лигандных зарядов.

Параметр электростатического взаимодействия в ряду кристаллов незначительно уменьшается с увеличением межионного расстояния, поэтому в ряду кристаллов $A^{II}B^{VI}$ это уменьшение было учтено, введя феноменологический коэффициент, который постоянен в этом ряду. Второй параметр электростатического взаимодействия $C=4.5 \times B$, как это следует из расчетов для свободного иона [15].

Параметр Dq в соответствии с формулой (1) должен быть пропорционален R_{AL}^5 . Отклонение от этой зависимости может означать, что заряд лигандов не является постоянной величиной и меняется в соответствии с изменением химической связи между ионом Ni и лигандами, перекрытием волновых функций и примесью ковалентной связи. Доля ковалентной связи зависит от разности электроотрицательности иона никеля и атомов лигандов. При уменьшении этой разности увеличивается доля ковалентной связи, и результирующий заряд лигандов уменьшается. Заряды лигандов, полученные из анализа в [12], представлены в табл. 2.

Учитывая зависимость параметров Dq , В и С от R_{AL} и используя значения спектральных параметров для ZnSe Ni^{2+} , определены значения параметра Dq и рассчитаны спектральные характеристики для иона никеля для всего массива материалов.

Рассчитанные энергетические уровни Ni^{2+} в кристаллах соединений $A^{II}B^{VI}$

При расчете мы использовали матрицу всех взаимодействий электронной конфигурации $d^5 40 \times 40$, с параметризацией В, С, Dq и 13 параметров кристаллического поля низкой симметрии [9, 10]. В приводимых расчетах симметрия окружения иона никеля в кристаллах $A^{II}B^{VI}$ тетраэдрическая, так что значения 12 из этих параметров равны нулю, кроме параметра Dq .

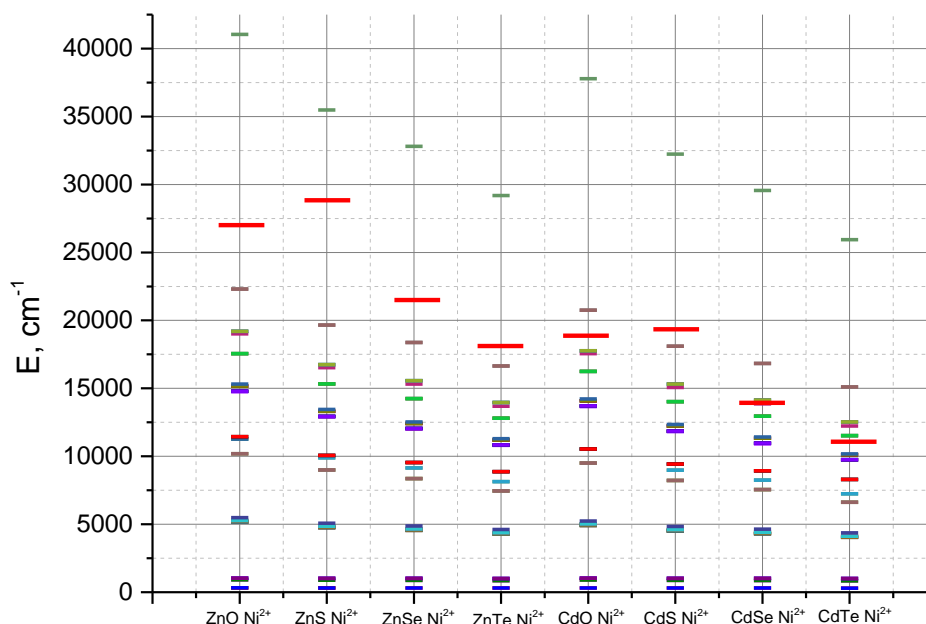


Рис. 1. Энергетические уровни $A^{II}B^{VI}$ соединений, легированных ионами Ni^{2+} , на примере ZnO, ZnS, ZnSe, ZnTe, CdO, CdS, CdSe и CdTe

Были вычислены энергия уровней и сила осцилляторов переходов с $(^3F)^3A_1$ уровней иона Ni^{2+} в CdO, CdS, CdSe, CdTe и ZnO, ZnS, ZnSe, ZnTe. Результаты этих расчетов приведены на рис. 1. Полученные при расчетах данные по полосам люминесценции совпадают с тремя основными полосами люминесценции ZnS и ZnSe, экспериментально измеренными в [5] в пределах погрешности измерения. Кроме длин волн, рассчитаны силы осцилляторов переходов спектра люминесценции для каждого из этих материалов. В табл. 2, 3 показаны силы осцилляторов при переходах из основного состояния с $(^3F)^3A_1$ иона Ni^{2+} на все остальные для CdO, CdS, CdSe, CdTe и ZnO, ZnS, ZnSe, ZnTe, соответственно. Важно, что рассчитываются не только энергии 45 уровней, но и силы осцилляторов переходов электродипольного типа, индуцированные нечетным потенциалом кристаллического поля.

Таблица 2

Энергия уровней и сила осцилляторов переходов в ионе Ni^{2+} в CdO, CdS, CdSe, CdTe

Состав	№	Уровни	CdO		CdS		CdSe		CdTe	
			E, cm^{-1}	$f(10^{-7})$	E, cm^{-1}	$f(10^{-7})$	E, cm^{-1}	$f(10^{-7})$	E, cm^{-1}	$f(10^{-7})$
	1	$(^3F)^3A_1$	0	-	0	-	0	-	0	-
	2	$(^3F)^3T_1$	315	78.61201	309	101.1646	306	83.46946	301	98.74145
	3		315	49.40182	309	61.06637	306	115.9439	301	63.31672
	4		315	41.26797	309	56.19194	306	49.97798	301	138.996
	5		892	195.12	868	246.3183	854	127.8382	832	153.254
	6		892	88.21055	868	113.3994	854	279.195	832	331.6524
	7		1030	217.5019	1020	337.6145	1015	364.1625	1006	453.0448
	8		1030	176.8243	1020	315.2761	1015	277.5818	1006	404.5319
	9		1030	260.5801	1020	190.3647	1015	319.8692	1006	300.7648
	10		$(^3F)^3T_2$	4913	176.9981	4509	318.3521	4311	229.4742	4045
	11	4913		259.7604	4509	309.9144	4311	338.3252	4045	633.7458
	12	4913		304.4981	4509	250.05	4311	392.2585	4049	382.6495
	13	4954		433.963	4538	516.7353	4331	668.931	4049	353.4984
	14	4954		535.7	4538	623.02	4331	565.2342	4049	353.2285
	15	5029		504.8456	4608	361.8387	4400	339.1429	4122	669.68
	16	5029		287.6699	4608	269.3676	4400	344.586	4122	463.3346
	17	5029		292.5891	4608	650.0132	4400	712.6885	4122	443.36
	18	5244		417.9274	4835	506.9247	4635	561.702	4370	652.0484

19	$(^3F)^3A_2$	9508	192.4738	8223	205.3168	7555	225.0089	6620	203.7693
20		9508	384.108	8223	187.7223	7555	290.7428	6620	300.9749
21		9508	413.271	8223	360.2827	7555	197.7633	6620	223.2966
22	$(^1G)^1T_1$	10537	60.61143	8987	75.56466	8244	102.5556	7243	136.1981
23		10537	57.23826	8987	92.17268	8244	102.1437	7243	143.6731
24		10538	207.1576	9432	631.0773	8938	872.5424	8304	1114.931
25	$(^1G)^1E$	10538	591.5853	9432	956.5649	8938	888.8722	8304	1119.528
26		10538	375.9805	9432	309.5248	8938	478.3845	8304	504.8023
27	$(^3P)^3T_1$	13679	2862.431	11831	3138.176	10940	3253.203	9731	2164.387
28		13679	1761.944	11831	1933.264	10940	2044.917	9731	3410.971
29		13708	2182.844	11860	2351.553	10968	2332.034	9758	3252.404
30		13708	2669.21	11860	2718.479	10968	2569.657	9758	2712.498
31		13708	2427.908	11860	2892.829	10968	3387.777	9758	2668.879
32		14079	2818.972	12225	2653.186	11330	3225.417	10116	3381.596
33		14079	1960.739	12225	2684.374	11330	2526.026	10116	3384.661
34		14079	2900.267	12225	3097.324	11330	3076.896	10116	2585.865
35		14219	2345.845	12338	2534.9	11425	2624.253	10177	2723.192
36		$(^1G)^1T_2$	16242	41.69111	14023	90.23832	12955	111.6121	11517
37	16242		50.98574	14023	89.30699	12955	102.7679	11517	204.1791
38	16242		72.02355	14023	91.95606	12955	140.3747	11517	164.071
39	$(^1D)^1T_2$	17551	42.36669	15063	70.19502	13862	93.25176	12234	145.0119
40		17761	8.603762	15313	13.08101	14131	18.84001	12529	24.75659
41		17761	9.049295	15313	19.45646	14131	16.19682	12529	22.39963
42	$(^1G)^1A_1$	17761	13.02167	15313	13.64005	14131	22.38584	12529	31.76821
45	$(^1D)^1E$	20749	9.677354	18106	31.0428	16827	38.74103	15104	23.75072
45		20749	20.30649	18106	14.24581	16827	17.58942	15104	53.39588
45	$(^1S)^1A_1$	37783	48.42584	32236	73.68239	29563	92.17637	25946	127.9237

Таблица 3

Энергия уровней и сила осцилляторов переходов в ионе Ni^{2+} в ZnO, ZnS, ZnSe, ZnTe

№	Уровни	ZnO		ZnS		ZnSe		ZnTe	
		E, cm^{-1}	$f(10^{-4})$	E, cm^{-1}	$f(10^{-4})$	E, cm^{-1}	$f(10^{-4})$	E, cm^{-1}	$f(10^{-4})$
1	$(^3F)^3A_1$	0	-	0	-	0	-	0	-
2	$(^3F)^3T_1$	318	68.18889	313	86.86109	310	62.1128	306	58.90359
3		318	46.4041	313	37.6772	310	51.94601	306	117.6608
4		318	32.32756	313	62.84729	310	98.55298	306	77.10761
5		905	170.994	883	97.22184	871	241.0357	852	283.6267
6		905	76.98254	883	214.4551	871	109.733	852	129.923
7		1034	117.4499	1026	251.1501	1021	319.3695	1014	381.8412
8		1034	206.2995	1026	270.2237	1021	203.7623	1014	266.3291
9		1034	245.1732	1026	202.9835	1021	297.8953	1014	329.7117
10		$(^3F)^3T_2$	5153	236.0026	4748	189.31	4550	300.6302	4287
11	5153		209.0437	4748	341.4049	4550	250.5374	4287	351.234
12	5153		229.4104	4748	262.118	4550	311.5873	4287	380.4831
13	5198		492.7003	4785	569.8006	4581	502.067	4304	570.7035
14	5198		390.4426	4785	465.2514	4581	619.0627	4304	674.5279
15	5278		344.06	4858	369.6709	4651	304.1177	4374	405.8739
16	5278		198.9551	4858	431.9796	4651	599.4822	4374	687.8233
17	5278		445.863	4858	357.7264	4651	355.4268	4374	317.6543
18	5486		376.1467	5077	451.0781	4877	496.5564	4611	569.1962
19	$(^3F)^3A_2$		10186	475.3442	8998	235.8274	8362	233.4303	7458
20		10186	283.4561	8998	371.2403	8362	314.0029	7458	322.2641
21		10186	368.9836	8998	263.2863	8362	223.0505	7458	127.8115
22	$(^1G)^1T_1$	11267	246.3107	9894	64.3738	9147	70.6943	8137	105.8114
23		11267	184.6081	9894	70.71551	9147	90.64515	8137	104.5324
24		11267	379.1552	10065	409.1536	9539	795.5961	8876	844.5993
5	$(^1G)^1E$	11449	46.41258	10065	373.7071	9539	337.9419	8876	708.7521
26		11449	51.36954	10065	691.5391	9539	689.6231	8876	734.76

27	$(^3P)^3T_1$	14766	2658.317	12916	1864.175	12022	1957.453	10813	2073.654
28		14766	1705.12	12916	2936.356	12022	3069.936	10813	3238.8
29		14794	2784.358	12945	2733.688	12050	2772.012	10841	1770.132
30		14794	2274.096	12945	2038.478	12050	2254.123	10841	3196.61
31		14794	1811.438	12945	2780.697	12050	2871.503	10841	3339.25
32		15169	1887.621	13314	2944.428	12416	2307.366	11203	3237.202
33		15169	2670.623	13314	3021.154	12416	2974.95	11203	3291.334
34		15169	2693.66	13314	2010.666	12416	3075.726	11203	2333.431
35		15320	2231.613	13444	2422.001	12532	2516.741	11295	2630.084
36		$(^1G)^1T_2$	17551	49.35824	15324	73.17507	14251	92.26648	12805
37	17551		43.96168	15324	75.5367	14251	75.16237	12805	160.0038
38	17551		32.74993	15324	52.1174	14251	89.71671	12805	95.91184
39	$(^1D)^1T_2$	19010	32.7028	16523	51.59145	15320	66.32728	13692	97.23103
40		19199	7.458401	16750	14.19933	15566	13.03391	13964	21.28607
41		19199	10.23504	16750	10.51565	15566	18.30634	13964	21.15357
42	$(^1G)^1A_1$	19199	6.883662	16750	11.35524	15566	12.84536	13964	16.69491
45	$(^1D)^1E$	22306	7.656189	19660	24.12626	18378	29.67988	16652	39.90469
45		22306	16.28319	19660	11.19026	18378	13.65106	16652	18.06984
45	$(^1S)^1A_1$	41043	38.60072	35489	57.1807	32808	70.41608	29184	95.02961

Таким образом, мы достигли основной цели проведенного аппроксимационного исследования – идентификации переходов и определении их энергии. Длины волн люминесценции при переходах с $(^3F)^3A_1$ уровня иона Ni^{2+} в диапазоне энергий от 0 до 12000 см^{-1} приведены в нанометрах на рис. 2.

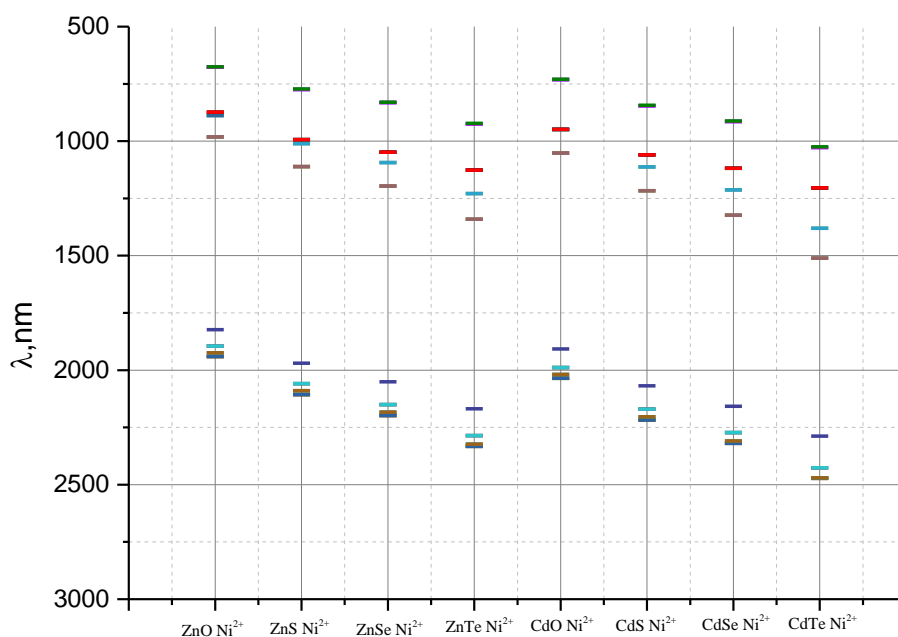


Рис. 2. Длины волн электронных переходов для ZnO, ZnS, ZnSe, ZnTe, CdO, CdS, CdSe, CdTe, легированных ионами Ni^{2+}

Заключение

С использованием нового способа аппроксимационной параметризации матриц для легированных Ni^{2+} материалов $A^{II}B^{VI}$, определены спектральные области люминесценции, силы осцилляторов и времена жизни для каждого перехода в ионе Ni^{2+} в массиве ZnO, ZnS, ZnSe, ZnTe, CdO, CdS, CdSe, CdTe.

Полученные расчетные значения спектральных областей люминесценции совпадают со значениями, полученными в ранее выполненных экспериментальных исследованиях другими авторами, что подтверждает правильность выбранного метода расчета.

Полученные результаты позволяют целенаправленно выбирать из всего рассчитанного массива переходов в материалах $A^{II}B^{VI}$ легированных Ni^{2+} наиболее подходящие для создания ИК лазеров с требуемыми значениями длины волны и спектральных характеристик излучения, перестраиваемых в широком диапазоне длин волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гоголева Н.Г. Применение лазеров в науке, технике и медицине / Н.Г. Гоголева. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2007.
2. Baranowski J. M. Crystal-field spectra of 3^{rd} impurities in II-VI and III-V compound semiconductors / J. M. Baranowski, J. W. Allen, G. L. Pearson // Physical Review. 1967. Vol. 160. P. 627-632.
3. Pappalardo R. Absorption spectra of transition ions in CdS crystals / R. Pappalardo, R.E. Dietz // Phys. Rev. 1961. Vol. 123. P. 1188-1203.
4. Weakliem H. A. Optical Spectra of Ni^{2+} , Co^{2+} , and Cu^{2+} in Tetrahedral Sites in Crystals / H.A. Weakliem // J. Chem. Phys. 1962. Vol. 36. P. 2117-2140.
5. Loescher D. H. The application of crystal field theory to the electrical properties of Co impurities in GaP / D.H. Loescher, J.W. Allen, G.L. Pearson // J. Phys. Soc. Japan Suppl. 1966. Vol. 21. P. 239-243.
6. Transition metal-doped zinc chalcogenides: spectroscopy and laser demonstration of a new class of gain media / L.D. DeLoach, R.H. Page, G.D. Wilke, S.A. Payne, W.F. Krupke // IEEE J. Quantum Electron. 1996. Vol. 32. P. 885-895.
7. Page R.H. Cr^{2+} – Doped zinc chalcogenides as efficient, widely tunable mid-infrared lasers / R.H. Page, K.I. Schaffers, L.D. DeLoach, G.D. Wilke, F.D. Patel, J.B. Tassano, S.A. Payne, W.F. Krupke, K.T. Chen, A. Burger // IEEE J. Quantum Electron. 1997. Vol. 33. № 4. P. 609-617.
8. Кустов Е.Ф. Орбитальная система структур наноразмерной дисперсности / Е.Ф. Кустов // Известия академии Инженерных наук им. А.М. Прохорова. 2013. № 1. С. 92-124.
9. Kustov E.F. Orbital Structure of Vibrations of Nanoparticles, Clusters, and Coordination Polyhedra / E.F. Kustov, V.M. Novotortsev, M.E. Kustov // Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2013. Vol. 58. № 14. P. 1624-1646.
10. Матрицы энергии и сил осцилляторов электро-дипольных переходов в ионах $3dn(n=2,3,4,6,7,8)$ конфигураций (Cr^{2+} , Co^{2+} , Fe^{2+} , Ni^{2+}) в кристаллических полях любой симметрии / Е.Ф. Кустов, И.Т. Басиева. Реестр базы данных № 2012621086 от 19.10.2012.
11. Расчет оптических спектров ионов Cr^{2+} , Cr^{3+} , Cr^{4+} , Co^{2+} , Co^{3+} , Fe^{2+} , Ni^{2+} в полупроводниках $A^{II}B^{VI}$, $A^{III}B^V$ / Е.Ф. Кустов, И.Т. Басиева. Реестр программ для ЭВМ №2012619507 от 19.10.2012.
12. ИК лазеры на полупроводниках $A^{II}B^{VI}$ и $A^{III}B^V$ с ионами Co^{2+} / Д.М. Кустов, А.В. Бундюк, Е.О. Гончаров, И.С. Курчатова // Известия Академии инженерных наук им. Прохорова. 2014. № 2. С. 49-52.
13. Исследование материалов для ИК лазеров на основе полупроводников $A^{II}B^{VI}$ и $A^{III}B^V$ легированных ионами Co^{2+} / И.С. Курчатова, А.В. Бундюк, И.Т. Басиева, Д.М. Кустов // Вестник СГТУ. 2014. № 2.
14. Dreyhsig J. Nature of optical transitions in the charge-transfer region of ZnS:Co and ZnSe:Co / J. Dreyhsig, B. Litzenburger // Phys. Rev. B. 1996. Vol. 54. P. 10516-10524.
15. Кустов Е.Ф., Новоторцев В.М. Магнетохимия молекулярных структур / Е.Ф. Кустов, В.М. Новоторцев. URSS Crosand. М., 2014.

Курчатова Иван Сергеевич –
аспирант Национального исследовательского
университета «МЭИ», г. Москва

Ivan S. Kurchatov –
Postgraduate
National Research University Moscow Power
Engineering Institute, Moscow

Кустов Даниил Максимович –
Национальный исследовательский университет
«МЭИ», г. Москва

Daniil M. Kustov –
National Research University Moscow Power
Engineering Institute, Moscow

Статья поступила в редакцию 15.03.15, принята к опубликованию 11.05.15

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 629.195

И.А. Гришанов, Б.М. Бржозовский

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЛЬТРА КАЛМАНА

Рассматривается применение линейного фильтра Калмана для выделения низких частот в виброакустических сигналах, полученных при работе станка. Приведены обоснования необходимости применения фильтрации. Оценивается возможность экстраполяции и прогнозирования состояния мехатронной станочной системы с применением фильтра Калмана на основе имитационного моделирования поломки режущего инструмента.

Динамические многочастотные колебания, станки с ЧПУ, резание материалов, переходный процесс, фильтр Калмана, статистическое оценивание

I.A. Grishanov, B.M. Brzhozovsky

ANALYSIS OF THE CUTTING PROCESS USING THE KALMAN FILTER

The article discusses utilization of the linear Kalman filter to extract low frequency vibroacoustic signals obtained during the operation of the machine. The evidence for the need of filtering is provided. A possibility for extrapolating and predicting the state of mechatronic machine systems using the Kalman filter is estimated due to simulation of the cutting tool breakage.

Dynamic multifrequency vibrations, CNC machine tools, cutting materials, transient process, the Kalman filter, statistical estimation

Процесс резания на станках с ЧПУ определяется множеством факторов, связанных с состоянием функциональных блоков и узлов технологического оборудования. Качество механообработки часто оценивают на основе исследования многочастотных виброакустических колебаний инструмента относительно заготовки. Регистрация при этом осуществляется пьезоакселерометрами по двум или трем координатам. Ранее нами были использованы следующие виды статистического оценивания [1]: критерий инверсий, непараметрический t-критерий Стьюдента, дисперсионный анализ, метод обобщенного критерия, метод асимптотических критериев, метод значимых амплитуд и другие. В данной работе проводится исследование возможности оценивания неслучайных свойств квазистационарных многочастотных колебаний при резании на основе фильтрации Калмана. Это связано с тем, что в теории автоматического управления при синтезе систем часто используется фильтр Калмана для формирования вектора управления. При исследовании изменялись следующие параметры: скорость резания и глубина резания. Также были специально сформированы возмущения в виде предварительно выполненных проточек по всей длине обработки.

Преобразование регистрируемого сигнала в частотный спектр ускорений осуществлялось на основе быстрого преобразования Фурье. На рис. 1 показан спектр, рассчитанный по одной из записей вибрационного сигнала. Как видно, спектр содержит много составляющих, и по нему напрямую трудно выявить какие-либо доминирующие формы колебаний.



Рис. 1. Примерный вид спектра регистрируемого сигнала в диапазоне от 0,5 до 5 КГц

В связи с этим для выделения низкочастотной области был использован фильтр Калмана [4]. Коэффициент K при этом такой, чтобы отфильтрованное значение

$$x_{k+1}^{opt} = Kz_{k+1} + (1 - K)(x_k^{opt} + u_k) \quad (1)$$

в наименьшей степени отличалось от реальной амплитуды x_{k+1} . Отфильтрованное значение x_{k+1}^{opt} есть линейная функция от показания акселерометра z_{k+1} и предыдущего отфильтрованного значения амплитуды x_k^{opt} . А предыдущее отфильтрованное значение x_k^{opt} является, в свою очередь, линейной функцией от показания акселерометра z_k и соответственного отфильтрованного значения x_{k-1}^{opt} . То есть отфильтрованное значение зависит от всех предыдущих показаний сенсора

$$z_{k+1}^{opt} = \lambda + \lambda_0 z_0 + \dots + \lambda_{k+1} z_{k+1} \quad (2)$$

Для его применения были определены значения переменных, определяющие динамику процесса резания. Переменная, описывающая динамику системы, зависит от множества факторов, таких как износ инструмента, тепловые деформации в зоне резания и т.д. [2]. Математические модели этих процессов сложны, и получить значения коэффициентов не всегда представляется возможным, однако на малом отрезке времени эти явления оказывают несущественное влияние, поэтому принимаем значение этой переменной за 1. Для каждой реализации технологического процесса переменная, определяющая управляющее воздействие, зависит от режима резания и принимается за постоянную. В связи со сложностью динамических процессов, протекающих при резании, переменную, определяющую отношение между измерениями и состоянием системы, принимаем равной единице. Ошибка измерения была выбрана по паспорту пьезоакселерометров и аналого-цифрового преобразователя. Определение шума процесса определялось по дисперсии за частоту дискретизации. Общий результат фильтрации на примере продольного течения цилиндрической заготовки с проточками представлен на рис. 2.

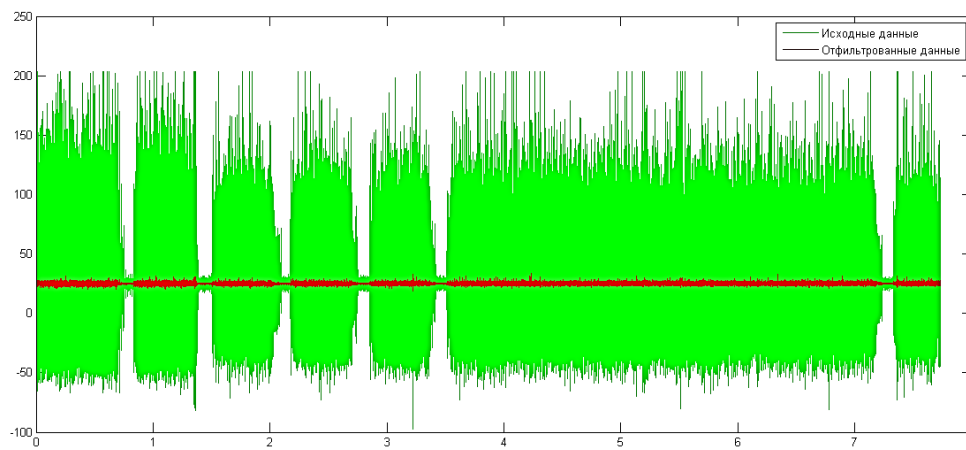


Рис. 2. Исходный и отфильтрованный фильтром Калмана сигнал

Исследовался переходный процесс при выходе токарного резца из проточки; производилась оценка реакции фильтра Калмана на отклонение параметров динамической системы станка при внешних воздействиях (рис. 3).

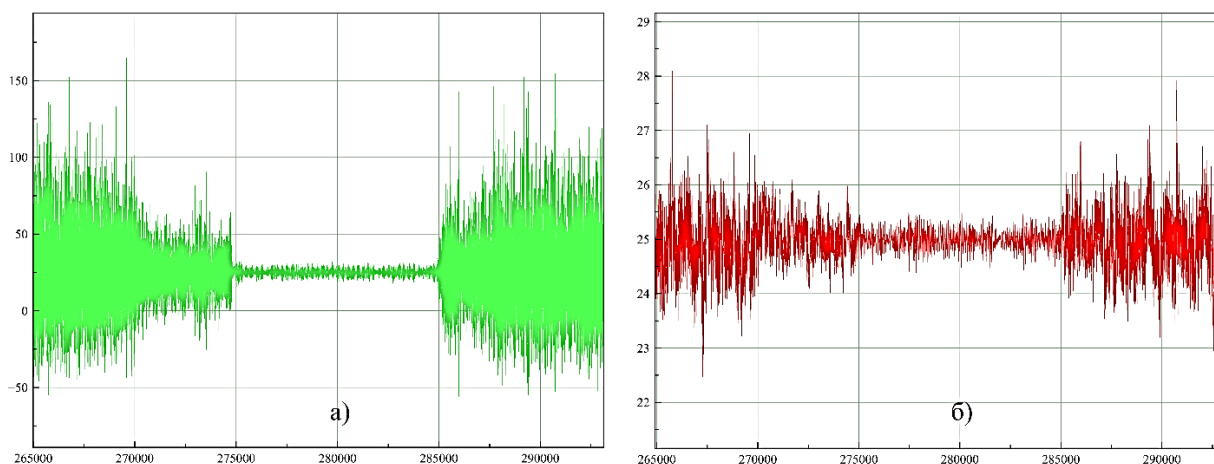


Рис. 3. а – исходный сигнал; б – фильтрованный сигнал

Анализ спектра исходного сигнала (не фильтрованного) не позволяет определить, какие колебания происходят в станке. Применяя фильтр Калмана и построив спектр, можно определить, что наиболее значимые изменения произошли в приводе подачи.

Спектр был построен для всех исследуемых сигналов, как исходных, так и отфильтрованных. Кроме того, используя метод значимых амплитуд [1], было установлено, что в данном случае неравновесности возникли при продольном точении и подрезании торца на частоте вращения шпинделя 800 мин^{-1} . Анализ спектра сигнала, отфильтрованного фильтром Калмана, позволил определить, что колебания происходят на частоте, не превышающей 1 кГц , что позволяет судить о наличии автоколебаний самого станка [2] (рис. 4).

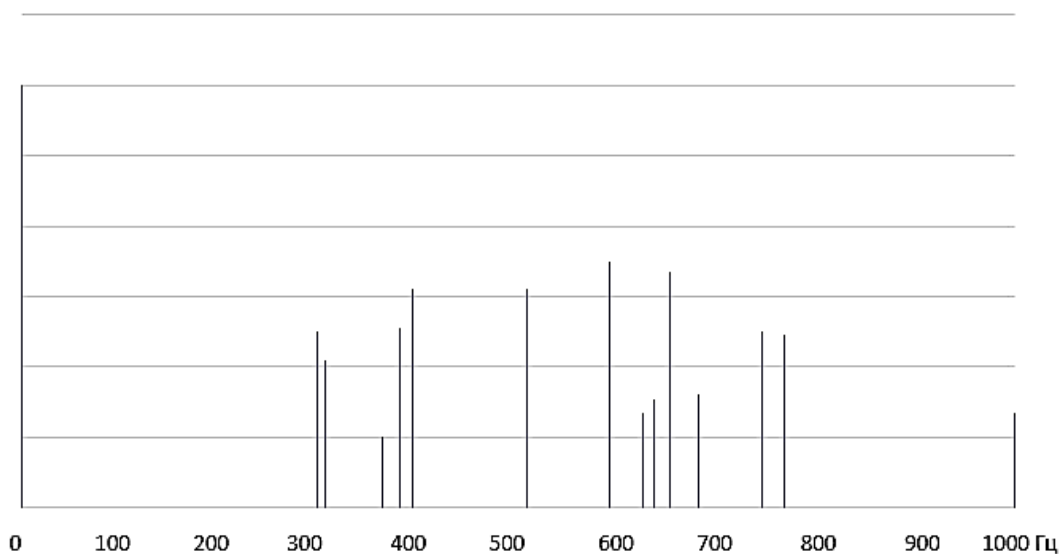


Рис. 4. Обобщенный спектр низкочастотных колебаний станка

Как видно, наибольшие неравновесности возникли на частотах $300 \dots 700 \text{ Гц}$. Наиболее значимая составляющая спектра также лежит в этом диапазоне, а исходя из [1], этому значению соответствует частота колебаний шпиндельного узла станка на собственной частоте. Как видно из рис. 5, амплитуда колебаний в первые 4 секунды обработки непрерывно изменялась, причем на частоте вращения 800 мин^{-1} по среднему значению, стандартному отклонению и коэффициенту вариации был получен худший результат, чем на частоте 630 мин^{-1} .

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о возможности создания программно-математического комплекса для идентификации динамического состояния металлорежущего оборудования в реальном времени с использованием фильтра Калмана.

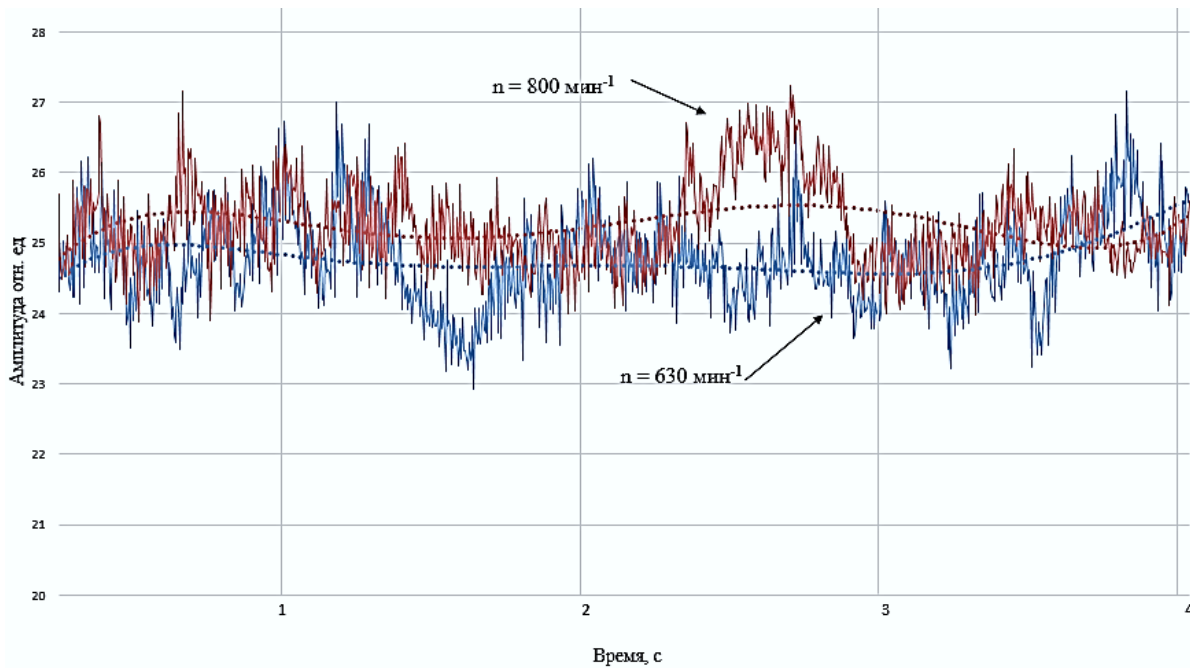


Рис. 5. Периодические колебания станка в первые 4 секунды обработки. Пунктирными линиями обозначены тренды этих колебаний

Для оценки чувствительности ситуаций, в которых требуется немедленное реагирование на отказ оборудования или поломку режущего инструмента, в исходный сигнал продольного точения был подмешан сигнал скола резца [3]. Ранее такие поломки мы определяли при помощи метода значимых амплитуд [1] (рис. 6).

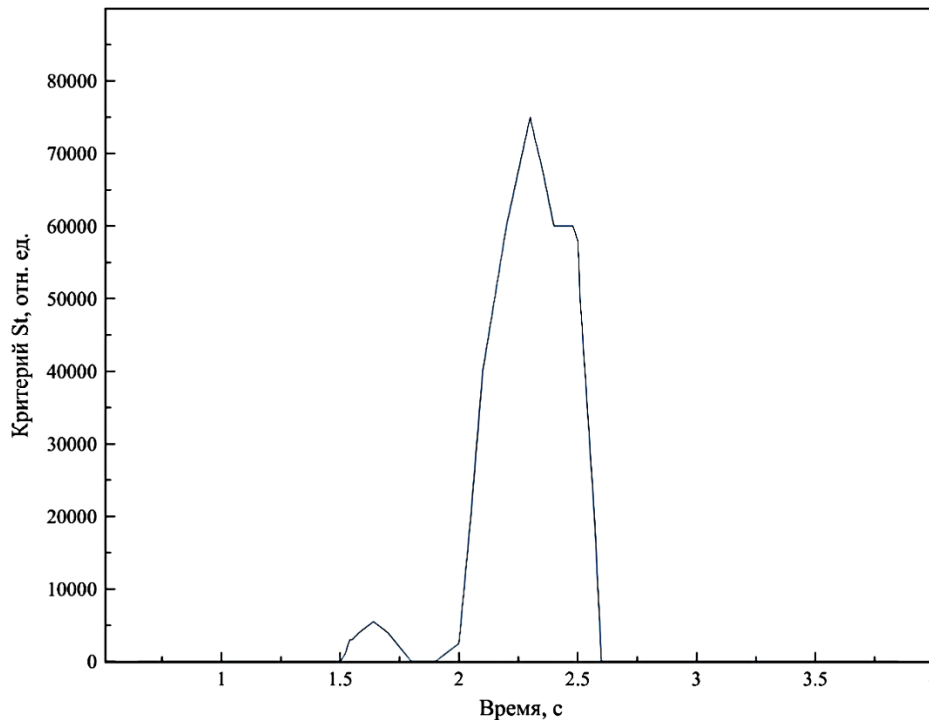


Рис. 6. Реакция критерия St на поломку режущего инструмента

Имитация такой аварии позволила определить, что в низкочастотной области также происходят существенные изменения параметров динамической системы станка (рис. 7).

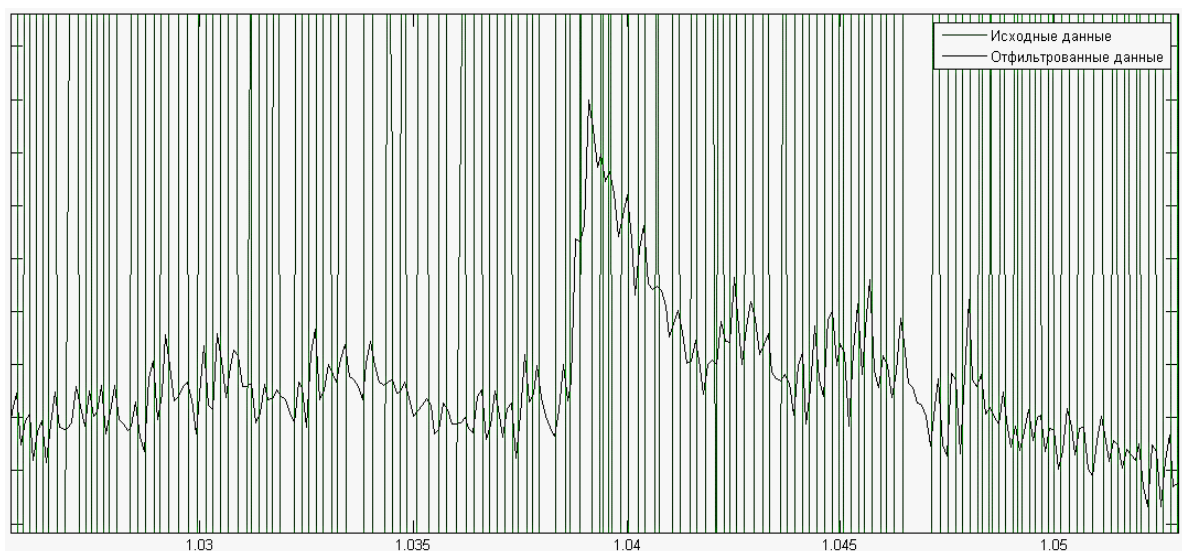


Рис. 7. Фрагмент отфильтрованного сигнала при поломке режущего инструмента

На основе материалов выполненных исследований можно сделать вывод, что фильтр Калмана при работе с сильно зашумленным сигналом позволяет перспективно выделять полезную информацию о существенных изменениях параметров и характеристик процесса резания. Частоты, полученные при использовании данного алгоритма, дают возможность анализировать изменения параметров технологического оборудования. Отфильтрованный сигнал может быть использован для диагностики и подналадки станка. Исследования также показали, что возможны экстраполяция и прогнозирование состояния рассматриваемых динамических процессов с применением калмановской фильтрации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Статистическое оценивание нелинейных процессов в мехатронных станочных системах: монография / Б.М. Бржозовский, М.Б. Бровкова, В.В. Мартынов и др.; под ред. Б.М. Бржозовского и В.В. Мартынова. Саратов: Изд. дом «Райт-Экспо», 2013. 160 с.
2. Орликов М.Л. Динамика станков: учеб. для вузов / М.Л. Орликов. 2-е изд., перераб. и доп. К.: Вища шк. Головное изд-во, 1989. 272 с.
3. Стабилизация динамического состояния станка как основа решения задач повышения точности механической обработки деталей / Б.М. Бржозовский, М.Б. Бровкова, В.В. Мартынов, И.Н. Янкин // Вестник СГТУ. 2006. № 3 (14). С. 61-70.
4. Kalman, R. E. (1960). A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // Journal of Basic Engineering 82 (1): 35-45. doi: 10.1115/1.3662552

Гришанов Илья Александрович – аспирант кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Илья А. Grishanov – Ph.D., Department «Design engineering and technological complexes» Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Бржозовский Борис Максович – доктор технических наук, профессор кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Boris M. Brzhozovsky – Dr. Sc., Professor Department «Design engineering and technological complexes» Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.12.14, принята к опубликованию 11.05.15

О.Ю. Жевалев, М.А. Приходько, Л.Е. Куц

БЫСТРОСЪЕМНАЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ СИСТЕМА РАДИАЦИОННОГО НАГРЕВА ДЛЯ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКИ

Рассматривается возможность совершенствования оборудования и технологии процесса диффузионной сварки разнородных материалов за счет разработки энергоэффективной системы радиационного нагрева и технологической оснастки, обеспечивающей выполнение процесса сварки. Тепловой расчет предложенной технологической оснастки показал возможность значительного повышения термического КПД системы нагрева установки УДС-2 и сокращения энергетических затрат.

Диффузионная сварка, технологическая оснастка, оптимизация, проектирование, температура, энергоэффективность, радиационный нагрев, термический КПД

O.Yu. Zhevaley, M.A. Prikhodko, L.E. Kuts

A QUICK-DETACHABLE ENERGY-EFFICIENT SYSTEM OF RADIATION HEATING FOR DIFFUSION WELDING

The paper deals with a possibility for improving the equipment and technology for diffusion welding of dissimilar materials due to development of energy-efficient radiant heating systems and technological equipment, which ensures fulfillment of the welding process. Thermal calculation and the offered industrial equipment showed a possibility for substantial increase in thermal efficiency of the heating system of the UDS-2 installation and reduction in energy cost.

Diffusion welding, technological equipment, optimization, design, temperature, energy efficiency, radiation heating, thermal efficiency

В настоящее время не производится серийный выпуск оборудования диффузионной сварки (ДС). Практически единственная серийная установка диффузионной сварки УДС-2 выпускалась в 1970-х годах (Саратов). Существует также выпущенная в единичных экземплярах установка А.306.08 (Фрязино). Указанные установки имеют схожие конструктивные компоновки, и первоначально использовались для процесса ДС [1, 2].

Основными недостатками конструкции установок УДС-2 с системой индукционного нагрева являются:

- 1) Существующее оборудование не обеспечивает требуемую точность регулирования параметров технологического процесса сварки.
- 2) Индукционный нагрев – это нагревание материалов электрическими токами, которые индуцируются переменным магнитным полем. Следовательно, это нагрев изделий из проводящих материалов (проводников) магнитным полем индукторов (источников переменного магнитного поля).
- 3) Интенсивному нагреву первоначально подвергается только наружная поверхность изделия.
- 4) Повышенная сложность оборудования, необходим квалифицированный персонал для настройки и ремонта.
- 5) Мощность индукционной системы нагрева составляет 25 кВт вне зависимости от размеров свариваемых деталей. Энергоэффективность системы нагрева низкая, так как нагреву подвергаются не только свариваемые детали, но и технологическая оснастка и стенки камеры.
- 6) Несмотря на небольшие размеры индуктора, высокочастотный генератор для индукционного нагрева в целом достаточно громоздок и маломобилен.

В связи с этим был проведен поиск конструктивных решений обеспечивающих концентрацию нагрева на свариваемых деталях для повышения энергоэффективности рассматриваемого оборудования.

Было принято решение заменить тип нагрева в установке УДС-2 с индукционного на более универсальный – радиационный и спроектировать быстросъемную технологическую оснастку, позволяющую:

- 1) Увеличить энергоэффективность системы нагрева;
- 2) Получить равномерный нагрев при соответствующем расположении нагревателя;
- 3) Обеспечить удобство и простоту как ручного, так и автоматического регулирования температуры;
- 4) Возможность нагрева тонколистовых и ток непроводящих материалов;
- 5) Добиться невысокой стоимости по сравнению с другими источниками нагрева;

Для повышения энергоэффективности радиационной системы нагрева была разработана конструкция технологической оснастки в керамическом корпусе рис. 1, которая позволяет проводить ДС с размерами деталей $\varnothing 10$ мм.

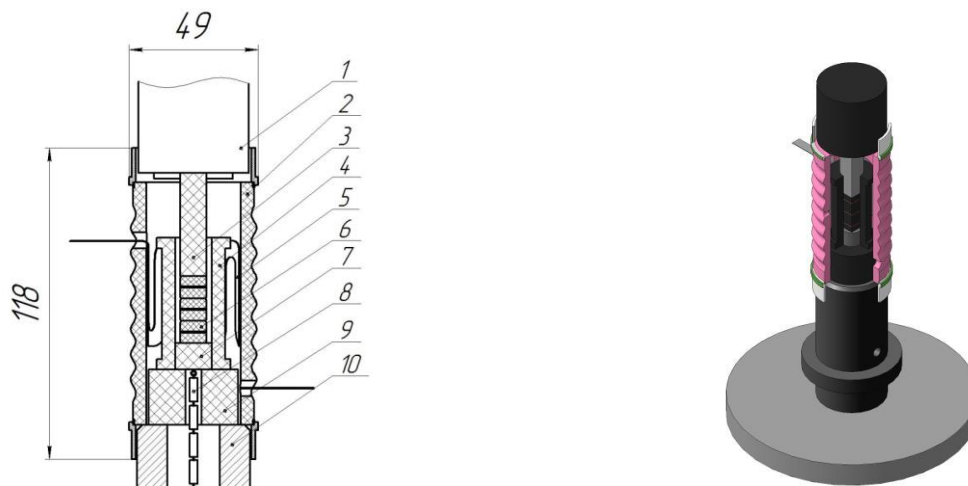


Рис. 1. Конструкция быстросъемной энергоэффективной системы радиационного нагрева

Данная оснастка содержит следующие детали: 1 – верхний упор из нержавеющей стали; 2 – керамический экран; 3 – керамическая прокладка, служащая направляющей; 4 – центрирующая обойма из керамики; 5 – ленточный нагреватель из молибдена; 6 – свариваемые узлы; 7 – прокладки из керамики с гнездом для термопары; 8 – термопара; 9 – кольцо из керамики для уменьшения теплоотвода; 10 – подставка из нержавеющей стали. В данную оснастку загружались 2 или 3 набора свариваемых деталей.

Также был разработан и изготовлен ленточный нагреватель из молибдена рис 2. Молибденовые нагреватели могут работать до температуры 1700 °С в вакууме и до 2200 °С – в защитной атмосфере. Такая разница температур обусловлена испарением молибдена при температурах выше 1700 °С в вакууме.



Рис. 2. Ленточный нагреватель из молибдена

Вариант осуществленной модернизации технологической камеры установки УДС-2 представлен на рис. 3.

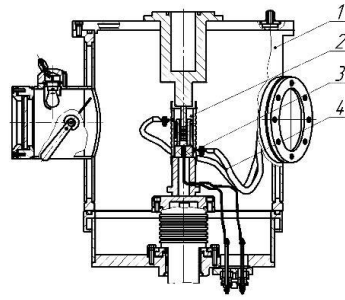


Рис. 3. Конструкция технологической камеры модернизированной установки УДС-2

Она состоит из: 1 – технологической камеры, в которую устанавливается 2 – технологическая оснастка, 3 – термопары, 4 – тоководов.

Расчетная мощность рассматриваемого нагревательного устройства составила: $P = 823$ Вт для температуры 1000 °С.

Выполнены экспериментальные проверки предложенной конструкции рис. 4.

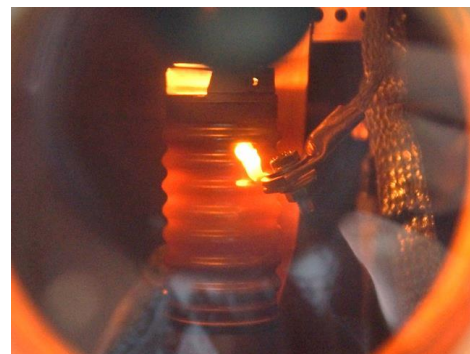


Рис. 4. Камера установки УДС-2 с установленной быстросъемной системой нагрева

Результаты экспериментов показали, что при температуре 1000 °С мощность системы нагрева составила 780 Вт (ток – 52 А, напряжение – 15 В). Сравнивая полученные результаты по мощности нагрева для предложенной быстросъемной радиационной системы нагрева с индукционной системой нагрева установки УДС-2, можно сделать вывод о повышении энергоэффективности системы нагрева до 30 раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Диффузионная сварка материалов: справочник / под ред. Н.Ф. Казакова. М.: Машиностроение, 1981. 271 с.
2. Конюшков Г.В. Специальные методы сварки давлением: учеб. пособие / Г.В. Конюшков, Р.А. Мусин. Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2009. 632 с.
3. Диффузионная сварка ферритометаллических узлов / О.Ю. Жевалев, Н.М. Котина, Г.В. Конюшков, Р.А. Мусин // Сварочное производство. 1986. № 4. С. 3-5.

Жевалев Олег Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Oleg Yu. Zhevaley – Ph.D., Associate Professor
Department of Welding and Metallurgy,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Приходько Михаил Аркадьевич – аспирант кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Mikhail A. Prikhodko – Postgraduate
Department of Welding and Metallurgy,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Куц Любовь Евгеньевна –
кандидат технических наук доцент кафедры
«Сварка и металлургия» Саратовского
государственного технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Oleg Yu. Zhevaley –
Ph.D., Associate Professor
Department of Welding and Metallurgy,
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.02.14, принята к опубликованию 11.05.15

УДК 621.924.93

В.В. Иванов, М.К. Решетников

КОМПЬЮТЕРНОЕ ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИДРОАБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ

Рассмотрена и обоснована необходимость использования единого подхода к исследованию процесса гидроабразивного резания. Разработана имитационная модель технологического процесса гидроабразивного резания позволяющая расширить возможности интенсификации технологического процесса обработки материала.

Имитационная модель, гидроабразивная струя, интенсификация, программный комплекс

V.V. Ivanov, M.K. Reshetnikov

COMPUTER SIMULATION OF THE CUTTING WATERJET

The paper reviews the need for a unified approach to the study of the waterjet cutting process. A simulation model for the waterjet cutting which intensifies processing of the material is developed.

Simulation model, water jet spray, intensification, software package

Несмотря на большое количество работ по проблемам математического моделирования процесса гидроабразивного резания, в настоящее время отсутствуют общие подходы к его разрешению. Таким образом, встает задача поиска оптимального методологического подхода к исследованию процесса гидроабразивного резания посредством математического моделирования с целью повышения производительности обработки материала, а именно создание имитационной модели процесса гидроабразивного резания [1].

Имитационная модель позволит получать информацию о результатах моделирования процесса гидроабразивного резания с учетом выбора режимных условий обработки, что открывает возможность прогнозировать и организовывать эффективный технологический процесс обработки материалов.

При разработке модели процесса гидроабразивной обработки использовались уравнения, позволяющие рассчитывать основные параметры технологического процесса и устанавливать взаимосвязь их с конструктивными параметрами оборудования при известных их начальных значениях в любой точке струи [2].

$$v_m = v_0 \left(\frac{1}{\rho_2 F} \frac{I_0}{A_2 + D_2 + (C_2 + E_2)} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

$$d_{cmp} = 0,44(H - R) \frac{B_2 + (0,5A_2 - C_2)\kappa}{B_2 + (A_2 - C_2)\kappa}, \quad (2)$$

$$h_{max} = k_m^{0,5} v_0 d \sqrt{\frac{\rho_2}{3k_d c \sigma_s} \cdot \frac{1}{\rho_1 F} \cdot \frac{I_0}{A_2 + D_2 + (C_2 + E_2)}}, \quad (3)$$

$$q = 1.9k_c \frac{d^3}{k_d^{3/4}} \left(k_m^{0.5} v_0 \sqrt{\frac{\rho_2}{3c\sigma_s} \cdot \frac{1}{\rho_1 F} \cdot \frac{I_0}{A_2 + D_2 + (C_2 + E_2)}} \right)^{5/2} \cdot \rho_d, \quad (4)$$

где v_m – скорость на оси струи; v_0 – начальная скорость струи; ρ_2 – плотность частиц абразива; F – площадь струи круглого сечения; A_2, B_2, C_2, D_2, E_2 – коэффициенты; R – внутренний радиус смесительной трубки сопла; I_0 – импульс струи; H – расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности материала; κ – подача; d_{cmp} – диаметр гидроабразивной струи у поверхности обрабатываемой детали; k_m – коэффициент, учитывающий влияние соседних частиц при обработке; v_0 – начальная скорость струи; d – средний диаметр частицы абразива; h_{max} – глубина внедрения частицы абразива в материал; ρ_1 – плотность жидкости; k_d – коэффициент, учитывающий влияние формы абразивной частицы на фактическую площадь контакта; c – коэффициент, оценивающий несущую способность контактной поверхности; σ_s – предел текучести материала детали; q – съем металла за один удар абразивной частицы; k_c – коэффициент стружкообразования; k_m – коэффициент, учитывающий влияние соседних частиц при обработке; ρ_d – плотность материала детали.

Аналитические уравнения (1)-(4) позволяют рассчитывать основные параметры технологического процесса обработки: скорость, диаметр струи у поверхности обрабатываемой детали, глубину внедрения частиц абразива в материал, съем металла за один удар абразивной частицы.

С целью увеличения режущей способности и повышения производительности гидроабразивной резки, предложено закручивать гидроабразивную струю путем нарезания в смесительной трубке спиралеобразной канавки с шагом h [3, 4].

Уравнения (1)-(4) приму следующий вид:

$$v_m = v_0 \left(\frac{I_0}{\rho_1 F} \frac{1}{A_2 + \frac{k^2}{h^2} D_2 + \varphi_m \left(C_2 + \frac{k^2}{h^2} E_2 \right)} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

$$d_{cmp} = 0,44(H - R) \frac{B_2 + \left[0,5 \cdot \left(A_2 + \frac{k^2}{h^2} D_2 \right) - \left(C_2 + \frac{k^2}{h^2} E_2 \right) \right] \kappa}{B_2 + (A_2 - C_2) \kappa}, \quad (6)$$

$$h_{max} = k_m^{0.5} v_0 d \sqrt{\frac{\rho_1}{3k_d c \sigma_s} \cdot \frac{I_0}{\rho_2 F} \cdot \frac{1}{A_2 + \frac{k^2}{h^2} D_2 + \varphi_m \left(C_2 + \frac{k^2}{h^2} E_2 \right)}}, \quad (7)$$

$$q = 1.9k_c \frac{d^3}{k_d^{3/4}} \left(k_m^{0.5} v_0 \sqrt{\frac{\rho_1}{3c\sigma_s} \cdot \frac{I_0}{\rho_2 F} \cdot \frac{1}{A_2 + \frac{k^2}{h^2} D_2 + \varphi_m \left(C_2 + \frac{k^2}{h^2} E_2 \right)}} \right)^{5/2} \cdot \rho_d, \quad (8)$$

где φ_m – концентрация частиц абразива на оси струи; k – поправочный коэффициент; h – шаг канавки гидроабразивного сопла.

На основании системы аналитических уравнений, отображающих процесс гидроабразивной резки, основанный на закручивании струи рабочей жидкости и без закручивания струи (протекающей в обычных условиях) был разработан программный комплекс «Jet of Nore», представленный на рис. 1.

В процессе разработки программного комплекса «Jet of Nore» для прогнозирования результатов гидроабразивной резки в технологическом процессе обработки были использованы следующие инструментальные средства: платформа Java, среда разработки NetBeans 6.8, язык программирования – Java. Мотивированный выбор инструментальных программных средств разработки в сфере информационных технологий обусловлен следующими причинами приведенными ниже [5, 6].

В качестве платформы была выбрана Java-платформа в связи с тем, что она предназначена для транспортировки и выполнения высоко интерактивных, динамических и безопасных апплетов и приложений на системах сетевых компьютеров.

В качестве среды разработки была выбрана бесплатная интегрированная среда NetBeans 6.8 по следующим причинам:

- среда разработки NetBeans 6.8 является современным, гибким средством, предоставляющим удобные механизмы для быстрой разработки распределенных приложений;
- среда разработки NetBeans 6.8 предоставляет широкий набор компонентов для доступа к данным, что делает ее удобной для разработки приложений работающими с базами данных.

Java был выбран в качестве языка программирования по следующим приведенным причинам:

- универсальность языка Java – поддерживается возможность исполнения Java-приложений под управлением различных операционных систем;
- важной особенностью Java является возможность создания Web-серверных приложений на базе технологии страниц JSP;
- наличие большого количества документации по работе в среде;
- универсальность и работоспособность на различных платформах, таких как Windows, Linux, Unix, Solaris, MacOS.

The screenshot shows the main form of the 'Jet of Hope' software. It contains several input fields for parameters, arranged in two columns. The parameters include:

- Текущий внутренний радиус водяного сопла, мм (Current internal radius of the water nozzle, mm)
- Начальная скорость струи, мм/мин (Initial jet speed, mm/min)
- Начальный весовой секундный расход жидкости, г/мин (Initial weight flow rate of liquid, g/min)
- Расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности, мм (Distance from nozzle to surface, mm)
- Начальный весовой секундный расход частиц, г/мин (Initial weight flow rate of particles, g/min)
- Средний диаметр частиц абразива, мм (Average particle diameter, mm)
- Начальная скорость струи в сопле, мм/мин (Initial jet speed in nozzle, mm/min)
- Плотность частиц абразива, г/мм³ (Abrasive particle density, g/mm³)
- Концентрация частиц абразива на оси струи, м⁻³ (Abrasive particle concentration on jet axis, m⁻³)
- Коэффициент, оценивающий несущую способность контактной поверхности (Coefficient evaluating the load capacity of the contact surface)
- Начальная скорость жидкости, м/с (Initial liquid speed, m/s)
- Предел текучести материала детали, кг/мм² (Yield strength of the material, kg/mm²)
- Начальная скорость примеси, м/с (Initial impurity speed, m/s)
- Плотность материала детали, г/мм³ (Material density, g/mm³)

 A blue button labeled 'Начать расчет' (Start calculation) is located at the bottom right of the form.

Рис. 1. Главная форма программного комплекса «Jet of Hope»

При разработке программного комплекса использовались предложенные математические модели и алгоритмы обработки процесса гидроабразивной резки в сочетании с методами объектно-ориентированного и структурного программирования, что позволило расширить возможности интенсификации технологического процесса гидроабразивной резки основанного на закручивании струи рабочей жидкости.

Главным преимуществом разработанного программного комплекса является возможность предварительного прогнозирования результатов и выдачу соответствующего информационного заключения или рекомендации процесса гидроабразивной обработки.

В таблице представлен пробный расчет гидроабразивной резки без закручивания струи и с закручиванием струи. Расчет проведен при условиях: расстояния до поверхности обрабатываемого материала 3 мм, текущий радиус водяного сопла 0,127 мм, начальный весовой секундный расход жидкости расход воды 2 л/мин, начальный весовой секундный расход абразива 350 г/мин.

Пробные расчеты

Гидроабразивная резка	Скорость гидроабразивной струи круглого сечения v_m , мм/мин	Глубина внедрения частицы абразива в материал при гидроабразивной резке h_{max} , мм	Величина съема металла за один удар абразивной частицы q , мм
без закрутки струи	84,587	0,2	0,0007
с закруткой струи	75,583	0,217	0,0008

Следовательно, разработанный программный комплекс «Jet of Hope» представляет интеллектуальную информационную систему по определению рациональных параметров процесса гидроабразивного резания включающий ввод и корректировку технологических параметров обработки, моде-

лирование процесса резания, генерацию и отображение информационного блока о результатах моделирования процесса обработки [7].

Кроме того, функциональную взаимосвязь характеристик струи с конструктивными параметрами сопла при гидроабразивной обработке можно будет использовать при проектировании технологического оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В.В. Состояние вопроса моделирования технологического процесса гидроабразивной обработки / В.В. Иванов, М.К. Решетников // Глобальный научный потенциал. 2013. № 9 (30). С. 49-51.
2. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович. М.: Физматгиз, 1960.
3. Шпилев В.В. Моделирование закручиваемой гидроабразивной струи при гидроабразивном резании / В.В. Шпилев, М.К. Решетников, Н.Н. Береда // Вестник СГТУ. 2011. № 2 (56). С. 163-168.
4. Метод увеличения режущей способности гидроабразивной струи / В.В. Иванов, В.В. Шпилев, М.К. Решетников, Н.Н. Береда // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2011: сб. науч. тр. SWorld по материалам Междунар. науч.-практ. конф. Вып. 4. Т. 6. Одесса: Черноморье, 2011. С. 18-23.
5. Бишоп Д. Эффективная работа: Java 2 / Д. Бишоп. СПб.: Питер; Киев: Изд. группа BHV, 2002. 592 с.
6. Вязовик Н.А. Программирование на Java: курс лекций / Н.А. Вязовик. М.: Intuit, 2003. 589 с.
7. Программный комплекс «Jet of Hore» для прогнозирования результатов гидроабразивной резки в технологическом процессе / В.В. Иванов, М.К. Решетников, А.В. Тихонов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617130, 14.07.2014 г.

Решетников Михаил Константинович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инженерная геометрия и промышленный дизайн» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Mikhail K. Reshetnikov – Dr. Sc., Professor, Head: Department of Engineering Geometry and Industrial Design, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Иванов Виктор Викторович – аспирант кафедры «Технология машиностроения», Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Viktor V. Ivanov – Postgraduate Department of Mechanical Engineering Technology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 22.12.15, принята к опубликованию 11.05.15

УДК 621.9: 681.5

С.С. Игнатьева, С.А. Игнатьев

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ ФАКТОРАМИ КАЧЕСТВА В ПРОИЗВОДСТВЕ ПОДШИПНИКОВ

Рассматриваются современные международные стандарты и их российские аналоги, используемые крупнейшими предприятиями подшипниковой промышленности.

Подшипниковая промышленность, качество, международные стандарты, стандарты серии ISO 9000, стандарт на подшипники качения ГОСТ 520-2011

S.S. Ignatyeva, S.A. Ignatyev

METHODOLOGY FOR CONTROLLING QUALITY FACTORS IN THE PRODUCTION OF BEARINGS

The paper examines the current international standards and their Russian counterparts applied at large-scale enterprises of the bearing industry.

Bearing industry, the quality, international standards, standards of series
ISO 9000, standard bearings GOST 520-2011

Потребности рынка машиностроительной продукции ежегодно увеличиваются, поэтому обеспечение качества, надёжности и безопасности готовых изделий – неотъемлемая часть политики в области менеджмента качества современных предприятий. Подшипники качения в качестве машинных элементов для передачи движения, являются продукцией с большой степенью обработки. Эксплуатационные характеристики подшипников зависят от качества обработки элементов, точности изготовления и качества применяемых материалов. Современные подшипниковые производства обеспечивают требуемый уровень качества от входа сырья до поставки готовой продукции.

В практике крупнейших компаний, таких как FKL Temerin, NKE Штайер, ЗАО СКФ контроль качества изделий осуществляется по всем стадиям жизненного цикла продукции [1, 2, 6-9]. Особое внимание уделяется следующим направлениям:

- кадры, квалификация и аттестация персонала и рабочих мест;
- материалы;
- процессы;
- контроль и испытания в ходе производства;
- контроль оборудования для измерения и испытания;
- упаковка и складирование;
- сервисное обслуживание и техническая поддержка;
- экологическая безопасность.

Обеспечение соответствия качества подшипниковых предприятий по всем ключевым аспектам состоит во внедрении стандартов качества продукции и процессов производства, применяемых в мировой и российской практике.

В области технического регулирования *технологических процессов и качества готовых изделий* подшипниковые предприятия могут использовать стандарты серии ИСО и их российские аналоги, а также принятые стандарты на продукцию – ГОСТы, СТБ, технические условия.

Серия стандартов ISO 9000 используются в большинстве развитых стран в качестве документов, подтверждающих высокую квалификацию компании, а также её персонала в той или иной сфере деятельности. В серию 9000 входят: сертификат ИСО 9000:2005 (основные положения системы менеджмента качества); ИСО 9001:2008 (требования к системе менеджмента качества); ИСО 9004:2009 (руководство по достижению успеха компании) и ИСО 19011:2011 (методы аудита в системе менеджмента).

Российским эквивалентом международного стандарта ISO 9000 является ГОСТ Р ISO 9000-2011 (аналог ISO 9000:2005) и ГОСТ Р ISO 9001-2011 (аналог ISO 9001:2008).

Управление долговечностью и надёжностью подшипников как изделий, требующих сложной обработки, определяется следующими группами факторов конструктивными, технологическими, эксплуатационными [3].

Таблица 1

Факторы качества производства и использования подшипников

Конструктивные	Технологические	Эксплуатационные
Выбор стали	Выбор метода получения заготовки	Правильный выбор подшипника по характеру нагрузки
Выбор смазки	Выбор режима механической обработки	Скорость вращения
Соотношение размера деталей	Выбор режима термической обработки	Рабочая температура
Зазоры	Технология сборки	Обеспечение посадки и соосности посадочных мест
Выбор типа опоры качения	Выбор оснастки, инструмента	Использование смазки и уплотнения
Конструктивное решение изделия и др.	Выбор методов контроля качества и др.	Правильность монтажа и др.
	Выбор методики диагностики параметров качества	

Действующие конструктивные требования к параметрам радиальных, радиально-упорных и роликовых конических подшипников установлены ГОСТ 520-2011 «Подшипники качения. Общие технические условия» (с изм. от 17.01.2013) [4]. Стандарт определяет размеры изделий, допуски по

классам точности, материалы, зазоры, шероховатость поверхностей качения, приемку, методы контроля, маркировки, транспортировки и хранения.

Для обеспечения требуемой твердости колец и роликов при рабочей температуре 120°C требуются марки стали ШХ-15, ШХ20СГ, 18ХГТ, 20Н2Н4А, 15Г1 при соблюдении неоднородной твердости материала в пределах 3HRC.

Шероховатость R_a наружных, торцевых поверхностей и отверстия колец определяется ГОСТ 2789, и ее предельный размер зависит от класса точности и номинальных диаметров изделий.

По согласованию с потребителем допускается изготовление подшипников с зазорами, требования по которым установлены ГОСТ 24810.

Грузоподъемность подшипника устанавливается расчетным способом в соответствии с ГОСТ 18854. Производитель может заявить и гарантировать статическую грузоподъемность выше расчетной при условии конструктивной модернизации изделия и проведении соответствующих испытаний. Динамическая грузоподъемность подшипников в 90% результатах стендовых испытаний должна быть не менее расчетной по ГОСТ 18855.

Шарики должны соответствовать нормам ГОСТ 3722, ролики по видам – ГОСТ 6870, 22696, 25255.

Стандарты качества содержат жесткие требования к дефектам поверхностей качения подшипников. Не допускаются прижоги, шлифовочные штрихи, полосы и пятна закалки. На монтажных поверхностях не должно быть забоин, раковин, шлифовальных штрихов, хромирования.

В зависимости от класса точности подшипника и дополнительных требований покупателя продукция должна проходить контроль по показателю вибрации. Все измерения уровней вибрации могут проходить в соответствии с требованиями действующих документов: ГОСТ Р 52545.1–2006 (ИСО 15242–1:2004) «Подшипники качения. Методы измерения вибрации», «Подшипники качения. Вибрация. Методика выполнения измерений. МВИ ВНИПП.02–04» и «Подшипники качения. Нормы вибрации. Руководящий документ. РД ВНИПП.038-08».

Выбор конструктивных параметров и контроль их соблюдения начинается с момента конструкторской разработки изделия, продолжается на заготовительном этапе, обеспечивается в процессе дефектоскопии, упаковки, маркировки и хранения.

Регулирование технологических факторов – второй базовый этап формирования требуемого качества изделий качения. Выбор инструмента, технологических операций и режимов обработки изделий, методов контроля качества должен обеспечивать конструктивные параметры, выход необходимого количества изделий, минимизировать сроки изготовления, быть экономически целесообразным.

Так, например, при выборе оптимальных условий шлифования поверхностей колец подшипников рекомендуется руководствоваться следующим алгоритмом [5]:

1. Формирование исходных данных (требований): геометрические параметры колец, шероховатость, требования по прижогам, допуски.
2. Расчетные данные: радиальные и касательные составляющие силы резания, фактическая шероховатость, интенсивность усилия магнитного стола и др.
3. Определение режима шлифования максимальной производительности, обеспечивающего допустимые требования.
4. Определение радиальной составляющей силы резания.
5. Расчет максимальной осевой деформации кольца.
6. Использование магнитного стола.
7. Шлифование без выхаживания при обеспечении требуемой шероховатости, допусков.
8. Выхаживание (при необеспечении требуемой шероховатости, допусков на предыдущей операции).

Для соблюдения входных параметров поверхности колец подшипника весомыми факторами могут быть: параметры шлифовальных кругов (зернистость, твердость круга, способ нанесения абразивного покрытия), глубина шлифования, скорость подачи стола, сила резания, использование или неиспользование магнитного стола. Регулирование данных факторов снижает образование прижогов, улучшает показатель шероховатости, позволяет не проводить заключительное выхаживание поверхности.

Конструктивные и технологические факторы в сумме формируют техническую эффективность подшипника (бесшумность, быстроходность, грузоподъемность), подтверждаемую в процессе эксплуатации. Негативное действие эксплуатационных факторов снижает долговечность и надежность подшипников.

Нарушения требований эксплуатации вызывают следующие дефекты изделий в процессе работы (табл. 2).

Отдельные эксплуатационные факторы и вызываемые ими дефекты подшипников

Эксплуатационный фактор	Дефект
Загрязнение подшипника во время монтажа	Вмятина, шероховатость
Нехватка смазки	Цвета побежалости, изношенность, шероховатые и окрашенные торцы роликов
Чрезмерная вибрационная нагрузка, проникновение инородных частиц	Дорожки, лунки, вмятины, коррозия
Неподходящая смазка, зазоры	Задиры на дорожках и роликах
Неправильное распределение усилий при монтаже	Задиры на дорожках качения
Прохождение электрического тока через подшипник	Темные бороздки, лунки, потемнение шариков
Слишком тугая посадка подшипника, некруглость посадочной поверхности, несоосность посадочных мест, возникновение разности температуры колец	Усталостные раковины, следы качения на дорожках

Таким образом, исследуя всю совокупность международных стандартов и их российских аналогов, следует признать, что совершенствование качества продукции подшипниковой отрасли должно проводиться комплексно, т.е. охватывая все стадии жизненного цикла продукции и все основные производственные процессы. Проблема многих российских предприятий именно в том, что восприятие качества как категории начинается и заканчивается только непосредственно в процессе испытания готового изделия, т.е. в середине полного жизненного цикла подшипника. Изготовить высокоточное изделие – это значит не только обеспечить оптимальные условия резки заготовок, шлифовки поверхностей, анализа дефектов. Это ещё и обеспечение поставок материалов высокого качества, подтверждение качества контрагентов, подготовка персонала, вспомогательных процессов, документирования, валидных КИПиА и средств мониторинга, управление выбросами и отходами, рекламациями. Комплексное управление качеством и его подтверждение возможно только через внедрение международных и аналоговых российских стандартов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никифоров А.Д. Управление качеством / А.Д. Никифоров. М.: Дрофа, 2004. 720 с.
2. Игнатъева С.С. Актуальные вопросы менеджмента качества продукции АПК в рамках международных торговых отношений / С.С. Игнатъева, В.В. Смирнов // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. 2013. № 08. С. 86-89.
3. Колтунов И.И. Разработка модели параметров качества подшипников качения / И.И. Колтунов, А.С. Лобанов // Известия МГТУ «МАМИ». 2013. № 1 (15). Т. 2. С. 54-60.
4. ГОСТ 520-2011 Подшипники качения. Общие технические условия.
5. Плоское шлифование торцов колец крупногабаритных подшипников с требуемым качеством поверхности / В.А. Носенко, В.Н. Тышкевич, С.В. Орлов, А.В. Саразов // Вестник ЮУрГУ. 2014. Сер. Машиностроение. Т. 14. № 4. С. 67-78.
6. <http://www.skf.com/ru/products/index.html>
7. <http://nke-bearing.narod.ru/>
8. <http://rusfkl.ru/>
9. <http://gosstandart-iso.ru>

Игнатъева Светлана Сергеевна – магистрант кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного университета имени Гагарина Ю.А.

Svetlana S. Ignatyeva – Postgraduate Department of Automation, Control and Mechatronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Игнатъев Станислав Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного университета имени Гагарина Ю.А.

Stanislav A. Ignatyev – Dr. Sc., Professor Department of Automation, Control and Mechatronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

А.А. Игнатъев, Е.М. Самойлова

МОДЕЛЬ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ РЕЗАНИИ В ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ СТАНКА. ЧАСТЬ 1

Аналитически с применением теории вычетов получено выражение для автокорреляционной функции виброакустических колебаний в динамической системе металлорежущего станка, аналогичное идентифицированному по экспериментальным данным.

Виброакустические колебания, динамическая система, металлорежущий станок автокорреляционная функция, теория вычетов

A.A. Ignatyev, E.M. Samoylova

AN AUTOCORRELATION MODEL FOR VIBROACOUSTIC FLUCTUATIONS WHEN CUTTING UNDER THE DYNAMIC TOOL SYSTEM. PART 1

The analytical method and the theory of deductions were applied to receive an expression for the automatic correlation functions of vibratory acoustic fluctuations in the dynamic system of the cutting metal tool, which is similar to the expression identified using the experimental data.

Vibroacoustic fluctuation, dynamic system, cut metal tool autocorrelation function, theory of deductions

В динамике станков важное место отводится измерению виброакустических (ВА) колебаний без резания и при резании и их анализу на основе определения различных характеристик: спектров, уровней колебаний на отдельных частотах, среднего уровня ВА колебаний в определенных диапазонах частот, АФЧХ динамической системы (ДС) станка, корреляционных функций и других [1-4]. Результаты измерений позволяют оценить техническое состояние станков, а также выбрать целесообразный режим резания с точки зрения качества обработки деталей.

Результаты ряда исследований на шлифовальных и токарных станках, проведенных в СГТУ, показали, что достаточно перспективным с точки зрения оперативности и применимости в производственных условиях является назначение режима резания, учитывающего как качество обработки, так и производительность, на основе вычисления запаса устойчивости замкнутой ДС станка [5, 6]. Запас устойчивости определяется из передаточной функции ДС, которая, в свою очередь, вычисляется из автокорреляционной функции (АКФ) ВА колебаний при резании при условии, что на вход ДС поступает сигнал типа «белый шум». Указанное справедливо для станков в стационарном режиме резания [7, 8], причем получаемые АКФ при различных значениях параметров технологического режима имеют вид затухающих косинусоид [5, 6, 9].

Научный и практический интерес в этом случае представляет получение теоретической АКФ ВА колебаний на выходе ДС станка. В связи с этим рассмотрим последовательность аналитического вывода АКФ на выходе ДС при подаче на вход сигнала типа «белый шум» при условии, что известна передаточная функция ДС станка.

Из классической работы [10] известно, что формула для вычисления АКФ на выходе ДС $K_{yy}(\tau)$ имеет вид

$$K_{yy}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{yy}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega, \quad (1)$$

где $S_{yy}(\omega)$ – спектральная плотность мощности сигнала на выходе ДС.

В свою очередь, известна формула

$$S_{yy}(\omega) = |W(j\omega)|^2 S_{xx}(\omega), \quad (2)$$

где $W(j\omega)$ – частотная функция ДС; $S_{xx}(\omega)$ – спектральная плотность мощности сигнала (СПМ) на входе системы.

В нашем случае СПМ входного сигнала типа «белый шум» $S_{xx}(\omega) = S_o = 1$, а ДС станка может быть описана колебательным звеном [7-9, 11] с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{K}{T^2 p^2 + 2gTp + 1}, \quad (3)$$

причем $0 < g < 1$.

Модуль частотной функции $W(j\omega)$, полученный из (3) заменой $p = j\omega$, выражается формулой

$$|W(j\omega)| = \frac{K}{\sqrt{(1 - \omega^2 T^2)^2 + 4g^2 T^2 \omega^2}}, \quad (4)$$

тогда

$$|W(j\omega)|^2 = \frac{K^2}{(1 - \omega^2 T^2)^2 + 4g^2 T^2 \omega^2} \quad (5)$$

Из формул (1), (2) и (5) следует, что

$$K_{yy}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{K^2 e^{j\omega\tau} d\omega}{(1 - \omega^2 T^2)^2 + 4g^2 T^2 \omega^2} \quad (6)$$

Следует отметить, что корни характеристического уравнения для (6) являются комплексными, т.к. ДС является колебательным звеном. Кроме того, корни ω_k ($k = 1, 2, 3, 4$) определяют полюса подынтегральной функции.

Для вычисления интеграла (6) следует использовать теорему о вычетах [12], в соответствии с которой при аналитичности однозначной функции $f(z)$ в области D , за исключением изолированных особых точек, замкнутый контур C принадлежит вместе со своей внутренностью области D и содержит внутри себя конечное число особых точек z_1, z_2, \dots, z_n и не проходит ни через одну из них, тогда

$$\frac{1}{2\pi j} \int_C f(x) dx = \sum_{k=1}^n \text{Res } f(z_k), \quad (7)$$

где $\text{Res } f(z_k)$ – вычет функции $f(z_k)$ в точке z_k .

Применяя к интегралу (6) теорему о вычетах, а также используя лемму Жордана [12], можно записать

$$\frac{1}{2\pi j} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{K^2 e^{j\omega\tau} d\omega}{(1 - \omega^2 T^2)^2 + 4g^2 T^2 \omega^2} = \sum_{i=1}^4 \text{Res } f(\omega_k), \quad (8)$$

где $f(\omega)$ – подынтегральная функция; ω_k – полюса функции $f(\omega)$, причем интегрирование выполняется по точкам верхней полуплоскости.

Для вычисления вычета в точке $z = z_k$, где z_k – простой полюс, а $f(z) = p(z)/q(z)$, причем $p(z)$ и $q(z)$ – аналитические функции в точке z_k и $p(z_k) \neq 0$, $q(z_k) = 0$, $q'(z_k) \neq 0$, используется формула

$$\text{Res } f(z_k) = \frac{p(z_k)}{q'(z_k)} \quad (9)$$

Тогда из формул (6), (8) и (9) следует, что

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{K^2 e^{i\omega\tau} d\omega}{(1 - \omega^2 T^2)^2 + 4g^2 T^2 \omega^2} = j \sum_{i=1}^4 \frac{p(\omega_k)}{q'(\omega_k)}, \quad (10)$$

где $p(\omega) = e^{i\omega\tau}$, $q(\omega) = (1 - \omega^2 T^2)^2 + 4g^2 T^2 \omega^2$; ω_k – корни уравнения $q(\omega) = 0$.

Для дальнейшего вычисления интеграла (10) необходимо получить выражения для комплексных корней $\omega_1, \dots, \omega_4$ и выяснить их расположение на комплексной плоскости.

Преобразуем функцию $q(\omega)$ к более удобному виду

$$q(\omega) = (1 - \omega^2 T^2)^2 + 4g^2 T^2 \omega^2 = 1 - 2\omega^2 T^2 + \omega^4 T^4 + 4g^2 T^2 \omega^2 = T^4 \omega^4 + 2T^2(2g^2 - 1)\omega^2 + 1 \quad (11)$$

Затем вычислим значения корней ω_k из биквадратного уравнения

$$T^4 \omega^4 + 2T^2(2g^2 - 1)\omega^2 + 1 = 0. \quad (12)$$

Введем замену переменных $z = \omega^2$, тогда имеем

$$T^4 z^2 + 2T^2(2g^2 - 1)z + 1 = 0. \quad (13)$$

$$z_{1,2} = \frac{-2T^2(2g^2 - 1) \pm \sqrt{4T^4(2g^2 - 1)^2 - 4T^4}}{2T^4},$$

$$z_{1,2} = \frac{-2T^2(2g^2 - 1) \pm 2T^2\sqrt{4g^4 - 4g^2 + 1 - 1}}{2T^4},$$

$$z_{1,2} = \frac{(1 - 2g^2) \pm 2g\sqrt{g^2 - 1}}{T^2}. \quad (14)$$

Из выражения (14) следует, что

$$\begin{cases} \omega_{1,2} = \pm\sqrt{z_1}, \\ \omega_{3,4} = \pm\sqrt{z_2}, \end{cases} \quad (15)$$

Следовательно, имеем 4 комплексных корня

$$\begin{cases} \omega_1 = \sqrt{z_1} = \frac{1}{T}\sqrt{(1 - 2g^2) + 2jg\sqrt{1 - g^2}}, \\ \omega_2 = -\sqrt{z_1} = -\frac{1}{T}\sqrt{(1 - 2g^2) + 2jg\sqrt{1 - g^2}}, \\ \omega_3 = \sqrt{z_2} = \frac{1}{T}\sqrt{(1 - 2g^2) - 2jg\sqrt{1 - g^2}}, \\ \omega_4 = -\sqrt{z_2} = -\frac{1}{T}\sqrt{(1 - 2g^2) - 2jg\sqrt{1 - g^2}} \end{cases} \quad (16)$$

Согласно лемме Жордана, вычисление интеграла (10) осуществляется с учетом корней, расположенных в верхней полуплоскости комплексной плоскости, при этом корни ω_K записываются в виде

$$\omega_K = \alpha_K + j\beta_K, \quad (17)$$

где $\alpha_K, j\beta_K$ – действительная и мнимая части корней, соответственно.

Для того чтобы привести выражения для корней (16) к виду (17), выполним операцию извлечения квадратного корня из комплексного числа:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{1}{T}\sqrt{(1 - 2g^2) + 2jg\sqrt{1 - g^2}} = \sqrt{\frac{\sqrt{(1 - 2g^2)^2 + 4g^2(1 - g^2)} + (1 - 2g^2)}{2}} + \\ &+ j\sqrt{\frac{\sqrt{(1 - 2g^2)^2 + 4g^2(1 - g^2)} + (1 - 2g^2)}{2}} = \frac{1}{T}(\sqrt{1 - g^2} + j\beta) = \alpha + j\beta, \end{aligned} \quad (18)$$

где $\alpha = \frac{1}{T}\sqrt{1 - g^2}$; $\beta = g/T$.

По аналогии вычисляются выражения других корней, тогда из соотношений (16) и (18) следует

$$\begin{cases} \omega_1 = \alpha + j\beta, \\ \omega_2 = -(\alpha + j\beta), \\ \omega_3 = \alpha - j\beta, \\ \omega_4 = -(\alpha - j\beta). \end{cases} \quad (19)$$

Из (19) следует, что при вычислении интеграла (10) в соответствии с леммой Жордана необходимо учитывать только два вычета, которые определяются корнями $\omega_1 = \alpha + j\beta$ и $\omega_4 = -\alpha + j\beta$, которые лежат в верхней полуплоскости.

Предварительно найдем выражение для производной от функции $q(\omega)$:

$$\begin{aligned} q'(\omega) &= 2(1 - \omega^2 T^2)2T^2\omega + 8g^2 T^2\omega, \text{ или} \\ q'(\omega) &= 4T^2\omega(1 - \omega^2 T^2) + 8g^2 T^2\omega. \end{aligned} \quad (20)$$

Подставив в формулу (20) вместо ω выражение $\omega_1 = \alpha + j\beta$ и выполнив алгебраические преобразования, получим

$$q'(\omega_1) = 4T^2(\alpha - \alpha^3 T^2 + 3\alpha\beta^2 T^2 + 2g^2\alpha) + j4T^2(\beta - 3\alpha^2\beta T^2 + \beta^3 T^2 + 2g^2\beta)$$

или

$$q'(\omega_1) = A + jB, \quad (21)$$

где A и B многочлены действительной и мнимой частей в формуле (21).

Аналогично для $\omega_4 = -\alpha + j\beta$ получаем

$$q'(\omega_4) = -4T^2(\alpha - \alpha^3 T^2 + 3\alpha\beta^2 T^2 + 2g^2\alpha) + j(\beta - 3\alpha^2\beta T^2 + \beta^3 T^2 + 2g^2\beta) \quad (23)$$

или

$$q'(\omega_4) = -A + jB \quad (24)$$

Вычислим интеграл (10) с учетом формул (19), (21) и (24),

$$\begin{aligned} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{K^2 e^{i\omega\tau} d\omega}{(1 - \omega^2 T^2) + 4q^2 T^2 \omega^2} &= jK^2 \left[\frac{e^{j(\alpha+j\beta)\tau}}{A + jB} + \frac{e^{j(-\alpha+j\beta)\tau}}{-A + jB} \right] = \\ &= jK^2 \frac{(A - jB)e^{j\alpha\tau} e^{-\beta\tau} - (A + jB)e^{-j\alpha\tau} e^{-\beta\tau}}{A^2 + B^2} = \\ &= j \frac{K^2}{A^2 + B^2} e^{-\beta\tau} (Ae^{j\alpha\tau} - jBe^{j\alpha\tau} - Ae^{-j\alpha\tau} - jBe^{-j\alpha\tau}) = \\ &= j \frac{K^2}{A^2 + B^2} e^{-\beta\tau} [A(e^{j\alpha\tau} - e^{-j\alpha\tau}) - jB(e^{j\alpha\tau} + e^{-j\alpha\tau})] = \\ &= \frac{K^2}{A^2 + B^2} e^{-\beta\tau} [B(e^{j\alpha\tau} + e^{-j\alpha\tau}) + jA(e^{j\alpha\tau} - e^{-j\alpha\tau})] = \\ &= \frac{2K^2}{A^2 + B^2} e^{-\beta\tau} (B \cos \alpha\tau + A \sin \alpha\tau). \end{aligned} \quad (25)$$

Следовательно, выражение для АКФ равно

$$K_{yy}(\tau) = K_0 e^{-\beta\tau} (B \cos \alpha\tau + A \sin \alpha\tau), \quad (26)$$

причем во времени оно представляет собой затухающую косинусоиду.

Изменение значений параметров технологического режима (подачи инструмента, скоростей вращения шпинделей круга и детали) обуславливает изменение значений параметров, входящих в передаточную функцию (3), а следовательно, и изменение запаса устойчивости ДС, по максимуму которого выбирается технологический режим. Определение реальных значений параметров передаточных функций осуществляется после идентификации АКФ, представленной формулой (26), по экспериментальным результатам измерения ВА колебаний, как это показано в [5, 6, 9]. Вычисление запаса устойчивости замкнутой ДС осуществляется либо с применением критерия Михайлова, либо по показателю колебательности [10].

Таким образом, теоретически получена модель АКФ ВА колебаний, аналогичная по форме экспериментальным, что подтверждает ее адекватность реальным процессам в динамической системе металлорежущего станка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудинов В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. М.: Машиностроение, 1967. 360 с.
2. Добрынин С.А. Методы автоматизированного исследования вибраций машин: справочник / С.А. Добрынин, М.С. Фельдман, Г.И. Фирсов. М.: Машиностроение, 1987. 224 с.
3. Risbood K.A. Prediction of surface roughness and dimensional deviation by measuring cutting forces and vibrations in turning process / K.A. Risbood, U.S. Dixit, A.D. Sahasrabudhe // Journal of Material Processing Technology. 2003. Vol. 132. P. 203-214.
4. Динамический мониторинг технологического оборудования / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, И.Н. Янкин, М.Б. Бровкова. Саратов: СГТУ, 2008. 312 с.
5. Игнатъев А.А. Повышение качества обработки колец подшипников на основе идентификации динамической системы шлифовального станка по автокорреляционным функциям виброакустических колебаний / А.А. Игнатъев, В.А. Каракозова // Вестник СГТУ. 2011. № 2 (56). С. 69-73.
6. Коновалов В.В. Идентификация динамической системы по автокорреляционной функции виброакустических колебаний / В.В. Коновалов, А.А. Игнатъев, С.А. Игнатъев // Вестник СГТУ. 2011. № 4 (60). С. 130-133.
7. Попов В.И. Динамика станков / В.И. Попов, В.И. Локтев. Киев: Техніка, 1975. 136 с.
8. Lin Z.H. In-process measurement and assessment of dynamic characteristics of machine tool structures / Z.H. Lin // Int. J. Mach. Tools Manufact. 1988. V.28. № 2. P. 93-101.
9. Игнатъев А.А. Стохастические методы идентификации в динамике станков / А.А. Игнатъев, В.А. Каракозова, С.А. Игнатъев. Саратов: СГТУ, 2013. 124 с.
10. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. М.: Наука, 1975. 768 с.

11. Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков / С.С. Кедров. М.: Машиностроение, 1978. 200 с.
12. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн; под ред. И.Г. Арамановича. М.: Наука, 1984. 832 с.

Игнатъев Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация, управление и мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksandr A. Ignatyev – Dr. Sc., Professor, Head: Department of Automation, Control and Mechatronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Самойлова Елена Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного технического университета.

Elena M. Samoylova – Ph. D., Associate Professor Department of Automation, Control and Mechatronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.11.14, принята к опубликованию 11.05.15

УДК 621.365.511

Н.Н. Клочкова, А.В. Обухова, А.Н. Проценко, А.С. Брятов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОЙ УСТАНОВКИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ СРЕДСТВАМИ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА FLUX

Рассматривается моделирование индукционной установки специального назначения, а именно расчет азимутального одновиткового индуктора для обеспечения равномерности распределения температуры по поверхности заготовки сферической формы. Для определения параметров индукционной установки подобной конструкции необходима трехмерная модель. Возможность построения такой модели предоставляет программный пакет Flux, разработанный для многопараметрического электромагнитного и теплового анализа.

Индукционный нагрев, многопараметрический анализа, электромагнитные и тепловые поля, метод конечных элементов

N.N. Klochkova, A.V. Obuchova, A.N. Protsenko, A.S. Bryatov

SIMULATION OF A SPECIAL PURPOSE INDUCTION UNIT USING THE FLUX SOFTWARE

The article discusses the modeling of a special-purpose induction installation, or the calculation of the azimuthal single-turn inductor, to ensure a uniform temperature distribution over the surface of the spherical shape of a workpiece. We need a three-dimensional model to determine the parameters of the induction installation of the construction. The possibility for constructing the given model is provided by the Flux software designed for the multi-parametric electromagnetic and thermal analysis.

Induction heating, multivariable analysis, electromagnetic and thermal fields, finite element method

При индукционном нагреве, как глубинном, так и поверхностном – закалке, чаще всего необходимым условием является равномерность распределения температуры [1]. Требуемое распределе-

ние температуры может быть достигнуто с помощью соответствующего распределения плотности тока по поверхности заготовки, для чего необходим индуктор определенной формы. Поэтому существенным моментом в проектировании индукционной установки является выбор конструкции индуктора и воздушного зазора между его внутренней рабочей частью и поверхностью нагреваемого изделия. Сложная форма деталей вызывает дополнительные сложности при нагреве. Сложными для нагрева оказываются детали с острыми углами и поверхностями с резкой кривизной в нескольких направлениях, в частности сферические поверхности.

Одним из вариантов конструкции индуктора для нагрева сферической поверхности может быть индуктор лепесткового типа чашеобразной формы [2].

Однако нельзя с уверенностью сказать, что распределение тока по проводнику такой сложной формы будет равномерным. Кроме того, практически недостижима требуемая равномерность плотности тока. В случае неравномерного распределения тока, равномерный нагрев невозможен.

От указанного недостатка свободен азимутальный трубчатый одновитковый индуктор с вращающейся заготовкой. Такой индуктор состоит из витка, расположенного под некоторым углом к горизонтальной плоскости.

Равномерность нагрева в таком индукторе может достигаться с помощью соответствующего выбора частоты тока, величины воздушного зазора, ширины или радиуса витка, угла наклона витка и скорости вращения заготовки.

Успешное решение задачи проектирования такого индуктора возможно только при наличии подробной и точной трехмерной модели.

Для определения параметров индукционной установки подобной конструкции необходима трехмерная модель. Возможность построения такой модели предоставляет программный пакет Flux, разработанный для многопараметрического электромагнитного и теплового анализа.

Пакет Flux – один из немногочисленных программных продуктов – предоставляет возможность построения трехмерных моделей объектов практически любой сложности [3, 4].

Программный пакет Flux, разработанный для многопараметрического анализа электромагнитных и тепловых полей методом конечных элементов, подходит для проектирования установок индукционного нагрева деталей сложной формы, в том числе и сферической.

Моделирование электромагнитного устройства в программах, реализующих метод конечных элементов для расчета полей различной физической природы, предполагает 5 этапов:

- геометрическое описание;
- генерацию сетки;
- описание физических свойств;
- процесс решения;
- постобработку результатов.

Первый этап в конечноэлементном расчете – это построение геометрической модели рассчитываемого устройства. Модель описывает форму исследуемого объекта. Параметризация геометрических размеров позволяет улучшать конструкцию модели на этапе решения задачи.

Генерация сетки – процесс, выражающий сущность метода конечных элементов.

Физическая модель строится для описания и параметризации физических свойств материалов. Она необходима для выполнения заключительных этапов, решения и обработки результатов.

Оптимизация конструкции и режимов работы исследуемой индукционной установки предполагает многократное решение задачи с последовательным изменением параметров в установленных пределах. Применение с этой целью современного программного пакета высокого уровня Flux позволяет провести полный компьютерный анализ геометрических, физических и энергетических параметров исследуемой индукционной установки.

В Flux возможны две стратегии геометрического описания:

- целостное описание: описание всего устройства в одном проекте Flux;
- раздельное описание частей устройства в нескольких проектах и последующее объединение проектов.

Вторая стратегия предпочтительнее.

Общая стратегия геометрического и конечноэлементного описания моделирования электромагнитных устройств с подробным описанием необходимых действий и возможностей используемого инструментария приведены в [1-4]. В данной статье излагается последовательность геометрического, конечно-элементного и физического описания индукционной нагревательной установки специального назначения.

Построение геометрической модели

Для построения геометрической модели любого объекта применяются основные средства геометрического описания Flux: геометрические объекты – точки, линии, поверхности, объемы, а также инструменты геометрических преобразований – параметры, трансформации и локальные системы координат.

Геометрическая параметризация применяется для удобства изменения размеров в процессе решения задачи. В рассматриваемом случае параметрами целесообразно назначить, в первую очередь, частоту индуктора и степень проявления скин-эффекта, то есть глубину проникновения тока в сталь нагреваемой заготовки и в медь индуктирующего проводника. В качестве параметров будут рассматриваться также:

- радиус сферы;
- радиус индуктора;
- угол наклона плоскости витка индуктора относительно горизонтальной плоскости;
- высота геометрического центра индуктирующего витка относительно центра сферы;
- внешний диаметр трубки индуктирующего проводника;
- внутренний диаметр трубки индуктирующего проводника.

Глобальная система координат, в которой решается задача, не предназначена для редактирования. Flux предоставляет пользователю возможность создавать собственную локальную систему координат. Для удобства построения геометрической модели и естественного задания параметров создаются две локальные системы координат. Центр одной располагается в геометрическом центре индуктирующего витка, центр другой – в геометрическом центре поперечного сечения трубки индуктирующего проводника.

Алгоритм построения геометрической модели сферы

Геометрический инструментарий:

1. Параметры:

- *SPH_R* – радиус сферы;
- *SPH_S* – толщина скин-слоя;
- *POLE* – угловой размер зоны полюса;
- *MOBILE_AIR* – толщина охватывающего многоугольного сфероида;

2. Система координат:

- *SPHERE_CS* – геометрический центр сферы для удобства управления положением сферы;

3. Трансформации:

– *AIR_1*, *AIR_2* – трансформации «Rotation defined by Angles and existing Pivot Point» на 30° и -30° соответственно, относительно центра системы координат *SPHERE_CS* в плоскости *XZ*, для построения образующей охватывающего многоугольного сфероида;

– *SPHERE_1*, *SPHERE_2* – трансформации «Rotation defined by Angles and existing Pivot Point» на $90-POLE$ и $-90-POLE$ соответственно, относительно центра системы координат *SPHERE_CS* в плоскости *XZ*, для построения образующих сферы и скин-слоя;

– *POLE_1*, *POLE_2* – трансформации «Rotation defined by Angles and existing Pivot Point» на $-POLE$ и $POLE$ соответственно, относительно центра системы координат *SPHERE_CS* в плоскости *XZ*, для построения образующих сферы и скин-слоя в зоне полюсов;

– *SPHERE_3* – трансформации «Rotation defined by Angles and existing Pivot Point» на 90° , относительно центра системы координат *SPHERE_CS* в плоскости *XY*, для построения поверхностей сферы и скин-слоя.

Инструментарий построения сетки конечных элементов:

1. Точки сетки (Mesh point):

- *SPHERE_C_MP* – центр сферы, размер элемента 3.5мм;

2. Линии сетки (Mesh Line):

- *SKIN_ML* – толщина скин-слоя, *min arithmetic* 2 сегмента;
- *POLE_ML* – зона полюса, *min arithmetic* 10 сегментов;
- *SPHERE_ML* – поверхность сферы и граница скин-слоя, *min arithmetic* 24 сегмента;
- *GEX_ML* – сегменты образующей сфероида, *min arithmetic* 5 сегментов.

Построение начинается с создания точек:

1. Центральная точка сферы с координатами 0, 0, 0 в системе координат *SPHERE_CS*.
2. Точка с координатами *SPH_R*, 0, 0 – поверхность сферы.

3. Точка с координатами SPH_R-SPH_TS, 0, 0 – граница скин-слоя.

4. Точка с координатами SPH_R+MOBILE_AIR, 0, 0 – поверхность охватывающего многоугольного сфероида (рис. 1).

Центральной точке сферы назначается точка сетки SPHERE_CENTER.

Трижды выполняя команду Create new line, соединяем все точки линиями типа Segment defined by Starting and Ending Points.

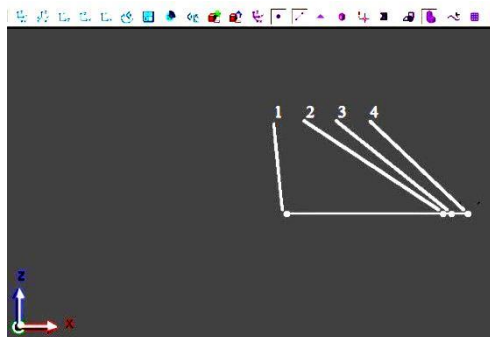


Рис. 1. Начало построения

Применяя команду Extrude Points к точкам 2 и 3, с помощью трансформаций SPHERE_1 и SPHERE_2 строим образующую сферы кверху и книзу от точки №2 и образующую границы скин-слоя кверху и книзу от точки №3. Угловой размер этих дуг меньше 90° . Построенным дугам назначается линия сетки SPHERE_ML. Полученные новые точки соединим радиально направленными отрезками. Этим отрезкам назначается линия сетки SKIN_ML.

Методом экструзии, используя трансформации POLE_1 и POLE_2, достраиваем дуги до $+90^\circ$ и -90° . Дополнительные дуги образуют специальные зоны в области полюсов. Полученным отрезкам дуг назначаем линию сетки POLE_ML. Соединяем крайние точки дуг с центральной точкой сферы.

Для обеспечения возможности расчета вращательного движения, необходимо заключить сферу в сфероид, образующая которого представляет собой ломаную линию из нескольких прямолинейных участков. Поэтому на данном этапе построим соответствующую линию. Используя трансформации AIR_1 и AIR_2, с помощью команды Propagate points построим по 3 новых точки вверх и вниз от точки №4, соединим их прямыми и затем выполним команду Build faces – построим все плоскости (рис. 2).

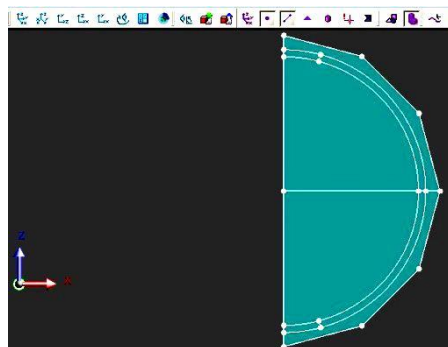


Рис. 2. Плоскости, подготовленные для образования объемов сферы и охватывающего сфероида

В соответствии с рекомендациями [5] на глубине проникновения тока сетка конечных элементов должна быть прямоугольной и не менее двух элементов по толщине слоя. Такую структуру сетки следует строить с помощью Mapped генератора. Однако такая сетка в зоне полюсов образует группу треугольных элементов с «плохими пропорциями» [5], то есть с углом при вершине меньше 15° . Такие элементы плохо просчитываются и тем самым значительно снижают точность расчетов.

Чтобы исключить подобную ситуацию, в проекте предусмотрены специальные зоны – Pole в области полюсов. Конечноэлементная сетка в этих зонах будет построена с использованием Automatic генератора. Это позволит повысить точность расчетов за счет правильной структуры сетки. Для управления размерами конечных элементов назначим различным частям построенной фигуры

элементы управления сеткой. Меш-линия Pole_ML присваивается границам зоны полюсов (рис. 3 а), меш-линия Sphere_ML – границам скин-слоя (рис. 3б), GEX_ML – сегментам сфероида (рис. 3 в) и SKIN_ML – толщина скин-слоя (рис. 3г).

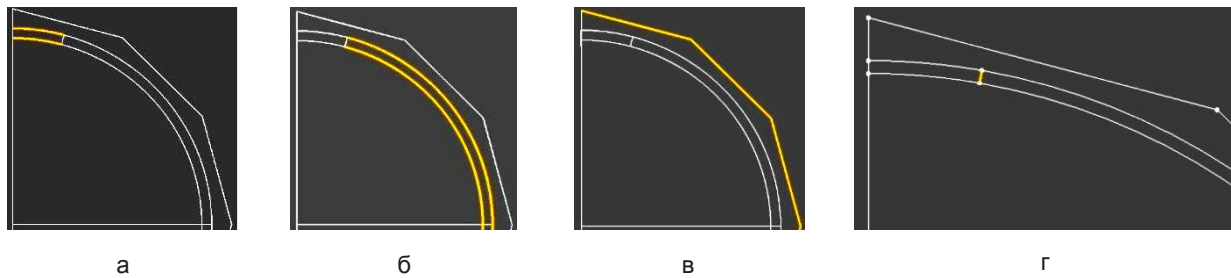


Рис. 3. Назначение линий сетки

Дальнейшее построение происходит путем экструзии плоскостей с помощью трансформации SPHERE_3. Для построения в скин-слое сетки прямоугольной конфигурации соответствующей плоскости (рис. 3б) назначается Mapped меш-генератор. Для упрощения построения и ускорения обработки в остальных объемах будет построена сетка треугольной конфигурации, и поэтому соответствующим плоскостям меш-генераторы не назначаются. Кроме этого, экструзия скин-слоя должна производиться с опцией, отличающейся от опций других операций экструзии. В связи со всем сказанным построение объемов удобнее всего выполнять в определенной последовательности. Сначала строим полюса и ядро сферы – операция экструзии соответствующих плоскостей с опцией Add Volumes, Faces, Lines and Points, затем выполняется экструзия скин-слоя с опцией Add Volumes and associated Extrusion Mesh Generators, и в конце – экструзия охватывающего сфероида опять с опцией Add Volumes, Faces, Lines and Points.

После этого необходимо назначить соответствующие меш-линии вновь образованным линиям (рис. 4).

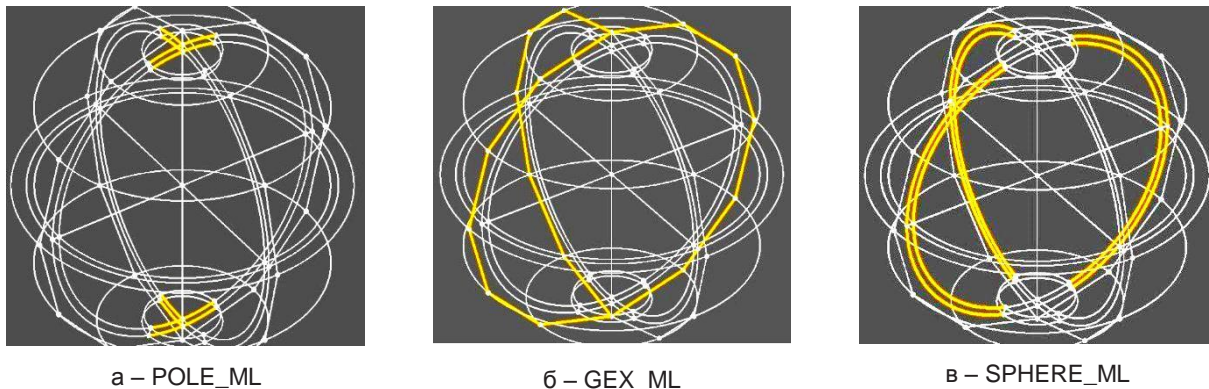


Рис. 4. Дополнительные линии сетки

Далее по команде Mesh all volumes of the geometry производим генерацию сетки конечных элементов.

Теперь можно сохранить проект, например, с именем Sphere. Перед записью рекомендуется удалить сетку конечных элементов по команде Delete mesh.

Следующий этап моделирования индукционной нагревательной установки – построение геометрической модели индуктора. Порядок геометрического описания в основном остается прежним.

Геометрические параметры:

- *IND_R* – радиус индуктора;
- *IND_RO* – внешний радиус трубки индуктирующего проводника;
- *IND_RI* – внутренний радиус трубки индуктирующего проводника;
- *IND_S* – толщина скин-слоя в индукторе;
- *IND_AL* – высота геометрического центра индуктора относительно центра сферы;
- *IND_YZ* – угол наклона плоскости витка индуктора относительно горизонтали.

Система координат:

- *INDUCTOR_CS* – геометрический центр индуктора.

Трансформации:

- *INDUCTOR_2D* – трансформация «Rotation defined by Angles and existing Pivot Point» на 90° , для построения сечения трубки индуктирующего проводника;

– *INDUCTOR_3D* – трансформация «*Rotation defined by Angles and existing Pivot Point*» на 90° , относительно центра системы координат *INDUCTOR_CS* в плоскости *YZ*, для построения витка индуктора.

Инструменты построения сетки конечных элементов.

1. Точки сетки (*Mesh point*):

– *IND_C_MP* – центр поперечного сечения трубки индуктирующего проводника, размер элемента 2 мм;

– *IND_SK_MP* – границы скин-слоя, размер элемента 1,5 мм;

– *IND_W_MP* – внутренний радиус трубки, размер элемента 2,5 мм.

3. Линии сетки (*Mesh Line*):

– *IND_RO_ML* – внешняя окружность трубки, тип *arithmetiс* 15 сегментов на четверть окружности;

– *IND_RW_ML* – внутренняя окружность трубки, тип *arithmetiс* 10 сегментов на четверть окружности;

– *IND_3D_ML* – осевая линия трубки, тип *arithmetiс* 30 сегментов;

– *IND_SK_ML* – толщина скин-слоя;

– *IND_CU_ML* – слой металла трубки глубже скин-слоя;

– *IND_W_ML* – внутренний радиус трубки.

Построение по-прежнему начинаем с создания точек поперечного сечения трубки индуктирующего проводника.

1. Центральная точка с координатами *IND_R, 0, 0* в системе координат *INDUCTOR_CS*;

2. Внутренний радиус трубки с координатами *IND_R+IND_RI, 0, 0*;

3. Внешний радиус трубки индуктирующего проводника с координатами *IND_R+IND_RO, 0, 0*;

4. Граница скин-слоя с координатами *IND_R+IND_RI, 0, 0*;

Присвоим точки сетки построенным точкам: 1 – *IND_C_MP*, 2 – *IND_W_MP*, 3 и 4 – *IND_SK_MP*. Линии сетки присваиваются следующим образом: линии а – *IND_W_ML*, линии б – *IND_CU_ML*, линии в – *IND_SK_ML*.

С помощью тройного повторения трансформации *INDUCTOR_2D* экструдируем линии на $\frac{3}{4}$ окружности с опцией *Add Volumes and associated Extrusion Mesh Generators*. На последнюю четверть экструдируем только точки.

Используя команду *Build Faces*, достраиваем недостающие поверхности. После этого внешней и внутренней окружностям трубки присвоим линии сетки *IND_RO_ML* и *IND_RW_ML* соответственно. Для построения прямоугольной сетки конечных элементов скин-слоя присваиваем меш-генератор типа *Mapped* соответствующей плоскости (рис. 5а). Остальным плоскостям присваиваем меш-генератор типа *Automatic* (рис. 5б).

Для продолжения геометрических построений сетку необходимо удалить. Теперь приступим к созданию объема. Используем для этого трансформацию *INDUCTOR_3D*. С ее помощью сначала экструдируем центральную точку сечения и присвоим полученной осевой линии индуктора линию сетки *IND_3D_ML*, это обеспечит правильную структуру сетки конечных элементов вдоль оси трубки индуктора. Затем для всех плоскостей сечения еще раз применим ту же трансформацию с опцией *Add Volumes and associated Extrusion Mesh Generators* для копирования установок сетки, сделанных для сечения, на всю длину индуктора.



Рис. 5. Плоскости с разными меш-генераторами для построения сетки конечных элементов: а – типа *Mapped*; б) типа *Automatic*

Проект сохраним с именем *Inductor_3D*. Еще раз сохраним этот проект с именем *Full* для сборки полного проекта. Перед сборкой удалим сетку и придадим индуктору рабочее положение – повернем его на 105° по часовой стрелке в плоскости витка и наклоним плоскость витка на 45° относительно горизонтали. С этой целью зададим следующие начальные значения системе координат

INDUCTOR_CS: поворот вокруг оси $Y=105^\circ$ в поворот вокруг оси $Z=-45^\circ$. После этого импортируем в проект сферу (рис. 6).

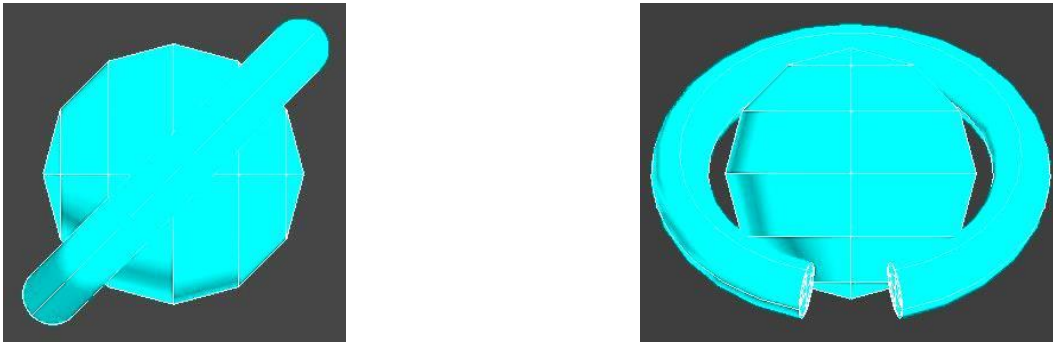


Рис. 6. Результат объединения проектов, сфера и индуктор

На этом построение геометрической модели заканчивается. Физическое и кинематическое описание модели будет рассмотрено в последующих статьях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сидоренко В.Д. Применение индукционного нагрева в машиностроении / В.Д. Сидоренко. Л.: Машиностроение. 1980, 231 с.
2. Моделирование индукционного нагрева с помощью программы Elcut 4.21: методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине «Методы расчета электромагнитных и тепловых полей» / сост.: В.Э. Фризен. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003. 27 с.
3. Шарাপова О.Ю. Численное моделирование процесса периодического индукционного нагрева на базе конечно элементного программного пакета FLUX / О.Ю. Шарাপова // Вестник Самар. тех. ун-та. Технические науки. 2011. Вып. 7 (28). С. 180-185.
4. Numerical simulation of multi-physics dynamic processes in induction heating systems granted by German Academic Exchange Service (DAAD) / E. Baake, K. Blinov, S. Korshikov, O. Sharapova // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: тр. XII Междунар. конф., Самара, Россия, 21-23 июня 2010 г. Самара: Самар. НЦ РАН. 2010. С. 88-92.
5. User guide Flux 11.2. Vol. 1. General tools, geometry & mesh. 2013.

Клочкова Наталья Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Самарского государственного технического университета

Natalya N. Klochkova – Ph.D., Associate Professor Department of Power Supply for Industry, Samara State Technical University

Обухова Алла Васильевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Самарского государственного технического университета

Alla V. Obukhova – Ph.D., Associate Professor Department of Power Supply for Industry, Samara State Technical University

Проценко Александр Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Самарского государственного технического университета

Aleksandr N. Protsenko – Ph.D., Associate Professor Department of Power Supply for Industry, Samara State Technical University

Брятов Александр Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Самарского государственного технического университета

Aleksandr S. Bryatov – Ph.D., Associate Professor Department of Power Supply for Industry, Samara State Technical University

А.Я. Красильников, К.Ю. Кравченко

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ РЕЖИМОВ КОНЦЕВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ ПО КРИТЕРИЮ АСИМПТОТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Представлен алгоритм отыскания режимов резания по условию асимптотической устойчивости линейного дифференциального уравнения с постоянным запаздыванием, описывающего модель концевое фрезерование с одной степенью подвижности. Алгоритм основан на построении кривых устойчивости на плоскости параметров резания «скорость вращения шпинделя – осевая глубина резания» и плоскости «относительное радиальное врезание – осевая глубина резания».

Устойчивость, вибрации, фрезерование, резание

A.Ya. Krasilnikov, K.Yu. Kravchenko

MAXIMIZATION OF THE CUTTING PARAMETERS IN END MILLING USING THE ASYMPTOTIC STABILITY CRITERIA

A new way to maximize the cutting parameters in the end milling is suggested. The given technique is based on asymptotic stability of the linear delay differential equation describing a single-degree-of-freedom model of the end milling. The method is proposed to estimate the combinations in the axial and radial depths of the cut and spindle speed. The method can be applied in the process engineering.

Stability, delay-differential, milling, chatter

Введение

Стратегическим направлением развития современного машиностроительного производства является интенсификация технологических процессов с целью повышения их производительности. Среди операций механической обработки одно из первых мест по применяемости и объему срезаемого с заготовок металла занимает фрезерование, в первую очередь, торцовое и концевое. Использование интенсивных режимов резания при черновом и полужестком фрезеровании сдерживается, главным образом, потерей динамической устойчивости системы. Динамика процессов резания является важным вопросом повышения эффективности механической обработки. Колебания могут быть причиной преждевременного износа режущего инструмента, низкого качества обработанной поверхности, снижения размерной точности и возникновения шума. Для предотвращения возможного брака по причине неустойчивости резания при обработке лезвийным инструментом режимы резания занижаются, тем самым снижая общую производительность. В свете этой проблемы перед инженерами встает задача определения оптимальных режимов резания для обеспечения высокоэффективной обработки.

Под устойчивостью понимается свойство системы сохранять свое состояние под воздействием внешних возмущений. Появление неустойчивого режима работы системы резания приводит к ухудшению шероховатости обрабатываемой поверхности и к размерной неточности. Впервые проблема устойчивости была сформулирована Кашириным А.И., впоследствии развита Кудиновым В.А., Эльясбергом М.Е., исследовалась в работах Соколовского А.П., Ильницкого И.И., Кедрова С.С., Орликова М.Л. и др.

Относительно природы первичного источника возбуждения автоколебаний при резании единой точки зрения до настоящего времени нет. Однако наиболее популярной гипотезой является точка зрения Ташлицкого Н.И. [1] о запаздывании изменения силы резания при изменении толщины срезанного слоя вследствие сближения и удаления инструмента и заготовки в процессе резания. Посредством обработки «по следу» (понятие введено Кудиновым В.А.) в автоколебательный контур вносится подавляющая доля энергии для поддержания автоколебаний.

Процесс обработки «по следу» среди зарубежных авторов впервые рассмотрели авторы Tobias S.A. и Fishwick W. [2], а также Plusty J. и Polacek M. [3]. Независимо друг от друга группы ав-

торов пришли к общему выводу. В частности, они объяснили, что модуляция толщины срезаемого слоя, вызванная автоколебаниями, продуцирует колебательное поведение силы резания. Авторы предложили использовать теорию устойчивости дифференциально-разностных уравнений для исследования динамики вторичных колебаний. Исследование устойчивости дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом для анализа моделей фрезерования позволило получить уравнения для определения областей устойчивости, которые графически отображаются на диаграммах устойчивости. Такие диаграммы позволяют технологу подобрать корректные режимы обработки и обеспечить устойчивость резания.

В 2005 г. Budak E. и Tekeli A [4]. предложили алгоритм интенсификации режимов резания, а именно осевой глубины резания, ширины фрезерования и скорости вращения шпинделя, соответствующие устойчивому резанию. Однако согласно предложенному методу, для отыскания корректного значения ширины фрезерования требуется многократные трудоемкие вычисления пар осевая глубина резания – скорость шпинделя. В связи с этим актуальной является задача разработки нового алгоритма отыскания режимов резания по условию устойчивости обработки и реализация единого компьютеризированного решения.

Унифицированное дифференциальное уравнение. Теорема об асимптотической устойчивости

В ряде работ, среди которых [5-7], представлена и исследована на устойчивость одномерная модель фрезерования. На основе модели с одной степенью свободы продемонстрирован основной принцип возникновения автоколебаний в результате наложения первичных и вторичных осцилляций. Ниже представлена схема конечного фрезерования в ортогональной плоскости с одной степенью свободы (рис. 1).

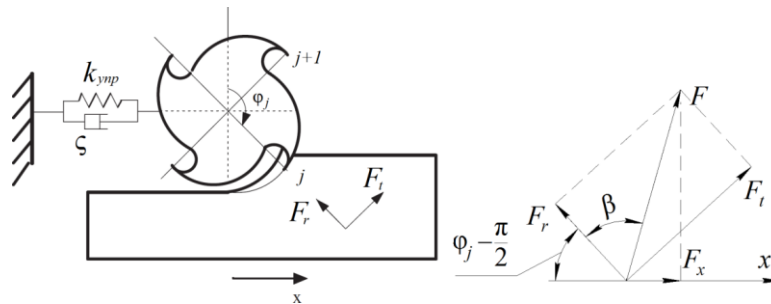


Рис. 1. Схема фрезерования с одной степенью свободы

Представленная схема позволяет описать модель фрезерования с учетом вращения инструмента. Уравнение движения рассматриваемой системы имеет вид (1).

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} + 2\zeta\omega_{\text{соб}} \frac{dx(t)}{dt} + \omega_{\text{соб}}^2 x(t) = \frac{\omega_{\text{соб}}^2}{k_{\text{упр}}} F(t) \quad (1)$$

где ζ – относительный коэффициент демпфирования; $\omega_{\text{соб}}$ – частота собственных колебаний системы, рад/с; $k_{\text{упр}}$ – коэффициент упругости, Н/м; T – постоянный период запаздывания, с; F_t – касательная составляющая силы резания, Н; $F(t)$ – сила резания, Н.

Мы рассматриваем систему с одним возможным смещением вдоль оси OX . Величина проекции силы $F(t)$ на выбранную ось определяется (2).

$$F_x(t) = -\sum_{j=1}^z K_s a_{\text{кр}} (f_t + x(t-T) - x(t)) \sin\varphi_j \sin(\varphi_j + \beta) \quad (2)$$

где K_s – удельная сила резания, МПа; $a_{\text{кр}}$ – осевая глубина резания, мм; f_t – подача на зуб, мм/зуб; φ_j – угловое положение j зуба относительно положительной полуоси OY ; z – эффективное число зубьев, одновременно участвующих в резании; T – период запаздывания между двумя последовательными резами, $T = 60/(z_{\text{об}}N)$, где N – скорость шпинделя, об/мин; $z_{\text{об}}$ – общее количество зубьев; $\beta = \pi/2 - \gamma$, где γ – передний угол инструмента.

Как было показано в [7], для рассматриваемой модели допускается исследовать линейную зависимость силы резания при условии (3).

$$f_t \sin\varphi_j > (x_F)^{\frac{1}{1-x_F}} \quad (3)$$

где x_F – безразмерный постоянный показатель, характеризующий нелинейность силы резания.

Постоянное значение $K_s a_{кр} f_i \sin \varphi_j \sin(\varphi_j + \beta)$ не влияет на устойчивость системы, а определяет лишь величину амплитуды колебаний, поэтому его можно отбросить при дальнейшем анализе, исследуя лишь динамическую составляющую силы резания. В проекции на ось X получим уравнения для компонента F_x (4).

$$F_x(t) = -K_s a_{кр} (x(t-T) - x(t)) \sum_{j=1}^z \sin \varphi_j \sin(\varphi_j + \beta) = K_s a_{кр} \Delta_x A(\varphi) \quad (4)$$

где $\Delta_x = x(t-T) - x(t)$.

Параметр $A(\varphi)$ определяет направление вектора силы резания и является функцией времени, причем $A \in L_2([\varphi_{st}, \varphi_{ex}])$, где φ_{st} – угол входа фрезы в контакт с заготовкой, φ_{ex} – угол выхода фрезы из контакта с заготовкой. Отметим, что на рис. 1 изображена векторная схема сил резания для случая попутного фрезерования. При рассмотрении встречного фрезерования вектора сил резания будут направлены в противоположную сторону. Перейти к инвариантному относительно φ виду возможно путем рассмотрения первого члена соответствующего ряда Фурье (5).

$$A(\varphi) = \frac{a_0}{2} + \sum_{r=1}^{+\infty} (a_r \cos(r\varphi) + b_r \sin(r\varphi)) \quad (5)$$

где коэффициенты Фурье функции:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{\varphi_{st}}^{\varphi_{ex}} A(\varphi) d\varphi, \quad a_n = \frac{1}{\pi} \int_{\varphi_{st}}^{\varphi_{ex}} A(\varphi) \cos(n\varphi) d\varphi, \quad b_n = \frac{1}{\pi} \int_{\varphi_{st}}^{\varphi_{ex}} A(\varphi) \sin(n\varphi) d\varphi \quad (6)$$

Для перехода к инвариантному во времени виду рассмотрим только первый член ряда (5). Таким образом, получим (7).

$$A_0 = \frac{a_0}{2} = \frac{1}{2\pi} \int_{\varphi_{st}}^{\varphi_{ex}} A(\varphi) d\varphi = \frac{z}{4\pi} (2\varphi + \sin 2\varphi - K_n \cos 2\varphi) \Big|_{\varphi_{st}}^{\varphi_{ex}} \quad (7)$$

В рассматриваемом исходном уравнении (1) произведем следующие замены, согласно (8).

$$\frac{d\hat{t}}{dt} = \omega_{cob}, \quad \frac{d\hat{T}}{dT} = \omega_{cob}, \quad a = 2\zeta, \quad k = \frac{K_s a_{кр} A_0}{2k_{упр}} \quad (8)$$

Тогда уравнение (1) примет вид (9).

$$\frac{d^2 x(\hat{t})}{d\hat{t}^2} + a \frac{dx(\hat{t})}{d\hat{t}} + x(\hat{t}) = k(x(\hat{t} - \hat{T}) - x(\hat{t})) \quad (9)$$

Уравнение (9) описывает рассматриваемую систему резания с одной степенью свободы в унифицированном виде с безразмерными коэффициентами a и k . Заметим, что коэффициенты a и k являются положительными вещественными числами.

Теорема 1. При фиксированном значении параметра a уравнения (9) каждому значению параметра $\hat{T}(k)$ соответствует такое значение параметра $k_{кр}$, что для любых $k < k_{кр}$ решение уравнения асимптотически устойчиво при условии

$$(a, k) \in \left\{ (a, k) \mid a \in (0, \sqrt{2}), k \in \left(\frac{a^2}{2} + a, +\infty \right) \right\}$$

Доказательство. Определим решение соответствующего однородного уравнения как $x(\hat{t}) = Q \exp[i(\omega\hat{t} - \psi_i)]$. Тогда $x(\hat{t} - \hat{T}) = x(\hat{t}) \exp[-i\hat{\theta}]$ согласно [7]. Подставим указанные выражения в уравнение (9).

$$1 - \omega^2 + ia\omega = k(e^{-i\hat{\theta}} - 1) \quad (10)$$

где $\hat{\theta} = \omega\hat{T} - \varepsilon_\psi$; ε_ψ – сдвиг между фазой ψ_i функции без запаздывания и $\psi_{\hat{T}}$ функции запаздывания; ω – относительная частота осцилляций; i – мнимая единица.

Результатом решения уравнения (10) относительно ω является (11).

$$\omega_{\pm}^2 = \omega_0^2 \pm \sqrt{\omega_0^4 - 2k - 1} \quad (11)$$

где $\omega_0 = \sqrt{k + 1 - a^2/2}$.

Уравнение (11) при рассмотрении полуоси $\omega_{\pm} > 0$, а также условие положительности параметров a и k приводит к набору ограничений, которые гарантируют дальнейшую структуру области неустойчивости.

$$(a, k) \in \left\{ (a, k) \mid a \in (0, \sqrt{2}), k \in \left(\frac{a^2}{2} + a, +\infty \right) \right\} \quad (12)$$

Как показано в [7] и [9], исходное уравнение (1) на мнимой оси может иметь корни $\pm i\omega_{\pm}$ и $\pm i\omega_{\pm}$ для всех $\omega_{\pm} > 0$, исходя из критерия устойчивости Найквиста, при $\hat{\theta} = 2\pi L$, где $L = 0, 1, 2, \dots$. В то же время значение фазового сдвига определяется как (13) согласно [9]. Исходя из вышеизложенного, получим (14).

$$\varepsilon_{\Psi}^{\pm} = 2\pi - 2\arctg\left(\frac{1 - \omega_{\pm}^2}{a\omega_{\pm}}\right) \quad (13)$$

$$\hat{T}_{\pm}(k) = \frac{1}{\omega_{\pm}(k)} \left(2\pi - 2\arctg\left(\frac{1 - \omega_{\pm}^2(k)}{a\omega_{\pm}(k)}\right) + 2\pi L \right), L \in \mathbf{N} \quad (14)$$

Зависимость (14) является уравнением кривой устойчивости. Ранее ([2, 3, 7–9]) кривая устойчивости задавалась параметрически. Очевидно, что граница устойчивости на плоскости параметров \hat{T} и k состоит из счетного числа подобных элементов (L – натуральное число). Каждый элемент границы будет складываться из двух несимметричных половин – $\hat{T}_{-}(k)$ и $\hat{T}_{+}(k)$. Кривые $\hat{T}_{-}(k)$ и $\hat{T}_{+}(k)$ сближаются, только если $\hat{\theta}_{-}(k) - \hat{\theta}_{+}(k) \rightarrow 0$, что возможно в единственном случае, когда $k \rightarrow k_0$, где $k_0 = a^2/2 + a$. Критическое значение $k_{кр}$ численно равно минимальному значению k , удовлетворяющему условию (14) для фиксированного значения \hat{T} . Теорема доказана.

Одним из параметров резания является величина относительного радиального врезания $RI = b/D_{фр}$, где b – ширина фрезерования, мм; $D_{фр}$ – диаметр фрезы, мм. Этот параметр характеризует глубину резания в ортогональной плоскости и также влияет на устойчивость обработки. При попутном фрезеровании $RI(\varphi_{\Delta}) = 0,5(1 - \cos\varphi_{\Delta})$, при встречном фрезеровании $RI(\varphi_{\Delta}) = 0,5(1 + \cos\varphi_{\Delta})$, где $\varphi_{\Delta} = \varphi_{ex} - \varphi_{st}$.

Теорема 2. Функция $a_{кр}(RI)$ на отрезке $RI \in (0, 1)$ имеет хотя бы один экстремум, причем при $k = const$:

$$a_{кр}(RI) = \frac{k_{упр}k}{K_s A_0(RI)} \quad (15)$$

Доказательство. Исходя из сделанной замены (7), получим (16).

$$a_{кр} = \frac{k_{упр}k}{K_s A_0} \quad (16)$$

Очевидно, что поведение функции $a_{кр}(RI)$ при постоянных прочих параметрах будет зависеть от поведения функции $A_0(RI)$. Выразим A_0 из (7) через φ_{Δ} , причем $\varphi_{ex} = \pi$, $\varphi_{ex} > \varphi_{st}$ для попутного фрезерования и $\varphi_{st} = \pi$, $\varphi_{ex} < \varphi_{st}$ для встречного фрезерования (16).

$$A_0(\varphi_{\Delta}) = \mp \frac{z}{4\pi} (\varphi_{\Delta} \cos\beta - \sin\varphi_{\Delta} \cos(\varphi_{\Delta} \mp \beta)) \quad (17)$$

где $\varphi_{\Delta} \in (-\pi, 0) \cup (0, \pi)$ исходя из $RI \in (0, 1)$. Диапазон $\varphi_{\Delta} \in (-\pi, 0)$ соответствует встречному фрезерованию, $\varphi_{\Delta} \in (0, \pi)$ – попутному. «–» – для случая попутного фрезерования, «+» – для случая встречного фрезерования. Знак перед выражением для A_0 определяется направлением вектора силы резания, действующую на кромку – при одинаковых прочих параметрах (материал заготовки, сечение срезаемого слоя, направление и величина подачи) векторы силы резания, действующей на режущую кромку, при разном направлении вращения шпинделя будут противоположно направлены

$$\frac{dA_0}{d\varphi_{\Delta}} = \mp \frac{z}{4\pi} (\cos\beta - \cos(2\varphi_{\Delta} \mp \beta)) \quad (18)$$

Таким образом, функция $A_0(\varphi_{\Delta})$ испытывает максимум при $\varphi_{\Delta} = (-\pi + \beta)$ для попутного фрезерования и максимум при $\varphi_{\Delta} = \beta$ в случае встречного направления фрезерования. Соответствующая функция $a_{кр}(RI)$ достигнет минимума при $RI = 0,5(1 - \cos\beta)$ при попутном фрезеровании и минимума при $RI = 0,5(1 + \cos\beta)$ при встречном фрезеровании.

Теорема доказана.

Сделаем замечание. В формулировке теоремы 2 нет указания на вид экстремума, поскольку вид функции $A_0(\varphi_\Delta)$ зависит от выбранной оси координат, в нашем случае это ось OX . При выборе основной оси OY функция $A_0(\varphi_\Delta)$ также будет иметь экстремумы, но не обязательно максимумы.

Интенсификация режимов резания

С помощью изложенных теорем разработан метод интенсификации режимов резания по критерию асимптотической устойчивости. Ранее метод интенсификации параметров резания был предложен в [4], однако предложенный метод является последовательным. Кратко метод, изложенный в [4], сводится к последовательности шагов:

- 1) для произвольного значения RI построить график границы устойчивости $a_{кр}(N)$;
- 2) на графике задать пару $(a_{кр}, N)$;
- 3) варьируя RI в пределах от 0 до 1, для выбранного на шаге два значения N определить множество значений $a_{кр}$;
- 4) на плоскости $a_{кр}(RI)$ расположить пары $(a_{кр}, RI)$.

Новый метод с параллельной оптимизацией параметров резания сводится к следующей последовательности вычислений:

- 1) задать пару (k, \hat{T}) , удовлетворяющую условию $k < k_{кр}$ и $\hat{T} = \hat{T}(k)$, согласно теореме 1;
- 2а) вычислить $N = 60\omega_{собр}/(z_{об}\hat{T})$;
- 2б) для диапазона $RI \in (0, 1)$ вычислить значения $a_{кр}$ при выбранном значении k ;
- 3) построить график $a_{кр}(RI)$.

Шаги 2а и 2б не являются зависимыми и могут быть выполнены параллельно. Таким образом, оптимизация параметров резания разделяется на оптимизацию скорости шпинделя и оптимизацию пары параметров – осевая глубина резания и относительное радиальное врезание. Также, как следует из (8), изменение жесткости системы влечет изменение параметра $a_{кр}$, а варьирование частоты собственных колебаний $\omega_{собр}$ влияет на изменение величины скорости вращения шпинделя.

Разделение оптимизируемых параметров в значительной степени упрощает программное решение задачи, поскольку для реализации первого метода требуется перебирать массивы в поисках $a_{кр}$. В то же время новый метод позволяет работать локально, поскольку изначально задана пара (k, \hat{T}) .

На рис. 2 изображена граница устойчивости для группы системы с коэффициентом относительного демпфирования 1,65%.

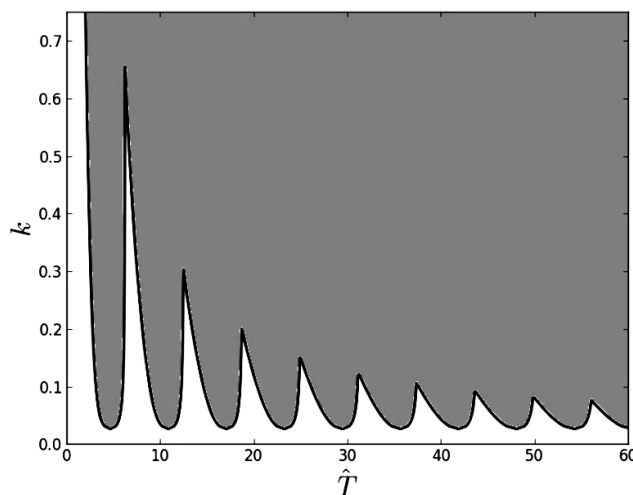


Рис. 2. Граница устойчивости для $a = 0,033$ (серым цветом показана область неустойчивых решений)

Соответствующая граница устойчивости для системы с динамическими параметрами $\omega_{собр} = 1308,11$ Гц и $k_{упр} = 4,459 \cdot 10^5$ Н/м, $K_s = 1253$ МПа, $\beta = 61^\circ$, $z = 1$, $z_{об} = 4$, $\varphi_{st} = -\pi/2$, $\varphi_{ex} = -\pi$ приведена на рис. 3.

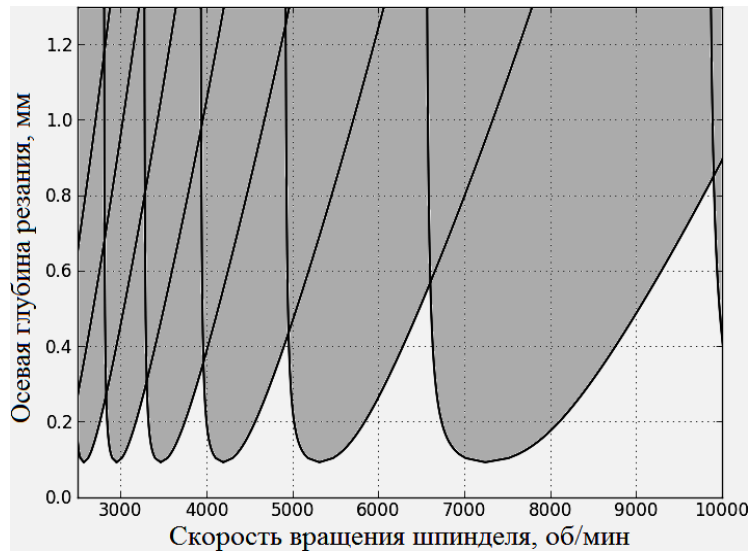


Рис. 3. Граница устойчивости для $\zeta = 0,0165$, $\omega_{\text{соб}} = 1308,11$ Гц, $k_{\text{упр}} = 4,459 \cdot 10^5$ Н/м, $K_s = 1253$ МПа, $\beta = 61^\circ$, $z = 1$, $z_{\text{об}} = 4$, $\varphi_{st} = -\pi/2$, $\varphi_{ex} = -\pi$

Для скорости шпинделя 9000 об/мин, что соответствует $\hat{T} = 13,7$, на рис. 4 представлен график зависимости $a_{\text{кр}}(R)$.

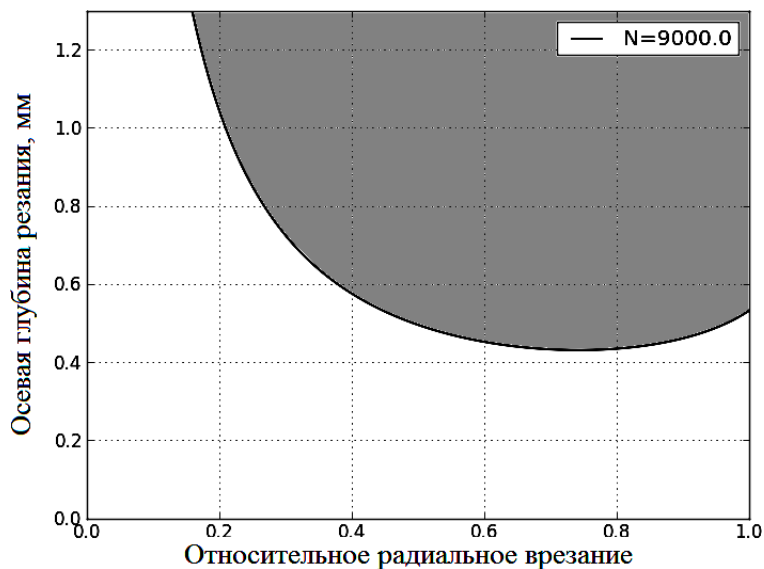


Рис. 4. График зависимости $a_{\text{кр}}(R)$ при $N = 9000$ об/мин

Очевидно, что кривая на рис. 4 имеет минимум. По графику можно задать пару $(a_{\text{кр}}, R)$, соответствующую устойчивому режиму автоколебаний. В результате интенсификации определены три параметра резания, соответствующие устойчивому режиму автоколебаний.

Устойчивость резания и производительность обработки

Как было отмечено выше, диаграммы устойчивости позволяют подобрать более высокие по величине параметры резания, в частности осевую глубину резания, ширину фрезерования и скорость вращения шпинделя. Тем не менее такой подход не гарантирует высокую производительность обработки. С целью обеспечить высокую производительность обработки необходимо провести оптимизацию показателя производительности – скорости снятия материала, выраженную в единице объема снятого материала в единицу времени (как правило, см³/мин). Однако разработка метода оптимизация функции скорости снятия материала не является целью представленной работы. И все же с целью придать завершенность работе и показать потенциал для будущих исследований рассмотрим вопрос о построении графика функции скорости снятия материала.

Поскольку скорость снятия материала пропорциональна произведению осевой глубины резания, ширины фрезерования и скорости вращения шпинделя, возникает задача отыскания такой комбинации допустимых значений параметров резания, при которых производительность будет наибольшей. Функция скорости снятия материала (19).

$$V_{\text{см}} = a \cdot b \cdot N \cdot f_t \cdot z_{\text{об}} \quad (19)$$

Как было отмечено выше, влиянием подачи на устойчивость автоколебаний можно пренебречь, а диаметр фрезы и вовсе не оказывает влияние на устойчивость, поэтому рассмотрим нормальную форму функции скорости снятия материала (20).

$$\bar{V}_{\text{см}} = \frac{V_{\text{см}}}{f_t \cdot D_{\text{фр}}} = a \cdot RI \cdot N \cdot z_{\text{об}} \quad (20)$$

Поставим задачу построить график функции критической скорости снятия материала (21), соответствующей границе устойчивости со значениями параметров резания $a_{\text{кр}}$, $RI_{\text{кр}}$.

$$\bar{V}_{\text{см, кр}}(a_{\text{кр}}) = a_{\text{кр}} \cdot RI_{\text{кр}} \cdot N \cdot z_{\text{об}} \quad (21)$$

Рассмотрим модель с одной степенью подвижности (рис. 1) с динамическими параметрами, приведенными выше (рис. 3). На рис. 2 изображена кривая устойчивости для унифицированного уравнения, на рис. 3 приведена граница устойчивости уже с учетом динамическим параметрами конкретной модели при $RI = 0,5$. На рис. 4 построена кривая зависимости осевой глубины резания от относительного радиального врезания, соответствующая границе устойчивости при $N = 9000$ об/мин. График функции (21) изображен на рис. 5 для различных вариантов направления фрезерования.

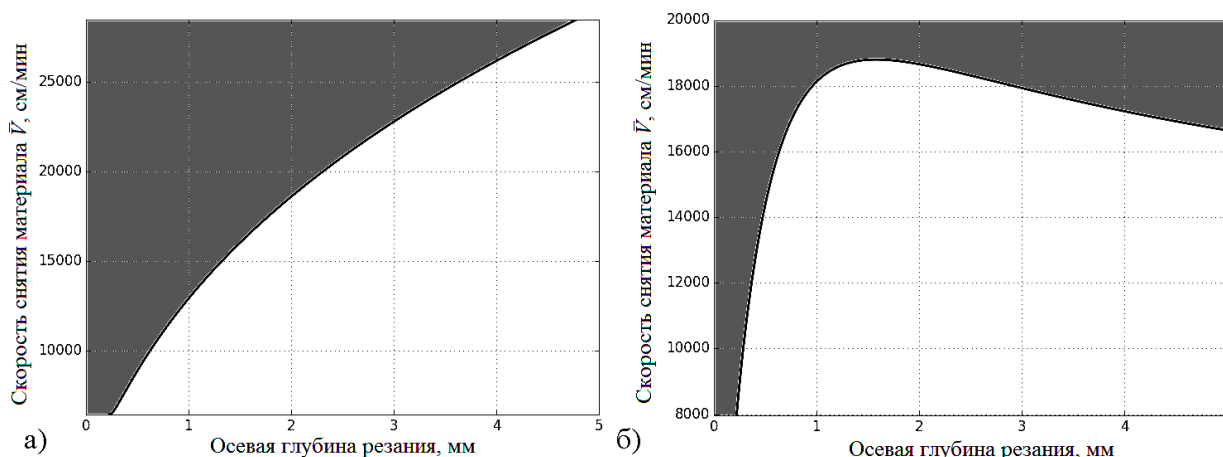


Рис. 5. График функции скорости снятия материала (21): а – для попутного фрезерования; б – для встречного фрезерования (серым цветом обозначена область неустойчивого резания)

На рис. 5а можно наблюдать максимум функции скорости снятия материала при встречном фрезеровании, в то же время на рис. 5б никаких экстремумов нет при встречном фрезеровании. Очевидно, что существование или отсутствие экстремумов функции скорости снятия материала определяется соотношением осевой глубины резания и относительного радиального врезания. Появление максимума рассматриваемой функции зависит от того, как быстро функция осевой глубины резания убывает или возрастает относительно функции относительного радиального врезания.

Заключение

В статье рассмотрена модель концевое фрезерования с одной степенью подвижности. Для представленной модели получено скалярное дифференциальное уравнение с постоянным запаздыванием в унифицированной форме, т.е. не зависящее от абсолютных динамических характеристик конкретной системы «деталь – инструмент – приспособление – станок». Для полученного уравнения сформулирована теорема об асимптотической устойчивости. На основе использования унифицированного уравнения и предложенной теоремы построены графики, отражающие положение границы устойчивости на плоскости параметров резания «осевая глубина резания – скорость вращения шпинделя» и «относительное радиальное врезание – осевая глубина резания». Разработан алгоритм интенсификации режимов резания с параллельным выполнением шагов. Также в работе показано, что функция критической скорости снятия материала не обязательно является монотонной функцией.

В статье раскрыта актуальность работы в области изучения вибраций при резании и перспективность исследований для оптимизации производительности обработки по критерию асимптотической устойчивости автоколебаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ташлицкий Н.И. Первичный источник автоколебаний при резании металлов / Н.И. Ташлицкий // Вестник машиностроения. 1960. № 2. С. 45-50.
2. Tobias S.A. The chatter of lathe tools under orthogonal cutting conditions / S.A. Tobias, W. Fishwick // Transactions of ASME. 1958. Vol. 80. Iss. 1. P. 1079–1088.
3. Tlustý J. The stability of the machine tools against self-excited vibrations in machining / J. Tlustý, M. Poláček // International Research in Production Engineering. 1963. Vol. 1. Iss. 1. – P. 465–474.
4. Budak E. Maximizing Chatter Free Material Removal Rate in Milling through Optimal Selection of Axial and Radial Depth of Cut Pairs / E. Budak, A. Tekeli // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2005. Vol. 54. Iss. 1. P. 353–356.
5. Budak E. Analytical prediction of chatter stability in milling – Part I: general formulation / E. Budak, Y. Altintas // Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME. 1998. Vol. 120. P. 22-30.
6. Stepan G. Modelling nonlinear regenerative effects in metal cutting / G. Stepan // Philosophical transaction of the Royal Society of London, Series A. 2001. Vol. 359. Iss. 1781. P. 739-757.
7. Красильников А.Я. Исследование устойчивости систем с запаздыванием, описывающих процесс фрезерования, в случае с одной степенью свободы / А.Я. Красильников, К.Ю. Кравченко // Вестник машиностроения. 2013. № 9. С. 67-75.
8. Insperger T. State-dependent delay in regenerative turning processes / T. Insperger, G. Stepan, J. Turi // Nonlinear Dynamics. 2007. Vol. 47. P. 275-283.
9. Красильников А.Я. Аналитические методы исследования устойчивости систем с запаздыванием, описывающие процесс фрезерования / А.Я. Красильников, К.Ю. Кравченко // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2013. № 9. С. 23-31.

Красильников Александр Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии машиностроения» Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина

Aleksandr Ya. Krasilnikov – Dr. Sc., Professor, Department of Mechanical Engineering Institute of Mechanical Engineering Technology, B.N. Yeltsin Ural Federal University

Кравченко Константин Юрьевич – аспирант кафедры Технологии машиностроения Механико-машиностроительного института Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина

Konstantin Yu. Kravchenko – Postgraduate, Department of Mechanical Engineering of Mechanical Engineering Technology, B.N. Yeltsin Ural Federal University

Статья поступила в редакцию 11.10.14, принята к опубликованию 11.05.15

УДК 621.791.18

Я.В. Перевозникова, А.П. Перекрёстов, Н.А. Вавилина

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСЧЁТНЫХ РЕЖИМОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКИ С ТЕРМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ ДАВЛЕНИЯ

Одной из основных задач в технологии диффузионной сварки с термическими системами давления (ТСД) при известном режиме технологического процесса классической диффузионной сварки данных материалов является разработка методики расчёта технологических параметров. Актуальность темы настоящей статьи в теоретическом плане обусловлена отсутствием универсальной модели,

удовлетворительно описывающей механическое поведение деформируемого твёрдого тела при изменениях напряжения и температуры в широких пределах, а в практическом – повышением эффективности диффузионной сварки с ТСД за счёт снижения трудоёмкости разработки процесса.

Технология диффузионной сварки, термические системы давления, методика расчёта, деформируемое твёрдое тело, напряжённо-деформированное состояние

Ya.V. Perevoznikova, A.P. Perekryostov, N.A. Vavilina

A MATHEMATICAL MODEL AND A METHOD FOR DEFINING RATING CONDITIONS USED IN DIFFUSION BONDING WITH THERMAL PRESSURE SYSTEMS

Calculation of technological parameters is a key issue in the technology of diffusion bonding with the thermal pressure systems (TPS) under the classical diffusion bonding process of given materials. The relevance of the theoretical aspect of this paper is due to the absence of a universal model which adequately describes the thermo-mechanical behavior of the solids under a wide range of stress and thermal variations. Efficiency of diffusion bonding with TPS can be improved due to reduction of labour inputs into design processes.

Diffusion bonding process, thermal pressure systems, calculation procedure, deformable solid, deflected mode

Технология диффузионной сварки с термическими системами давления (ТСД) в обыкновенных печах с защитной или восстановительной средой является специфичной и применяется только в отечественной промышленности (поэтому зарубежные работы на эту тему отсутствуют).

Разработку математической модели для определения технологических режимов диффузионной сварки с ТСД материалов начнём с построения расчётной схемы. Для этого разобьём термокомпрессионное устройство со свариваемыми заготовками (т.е. ТСД) на сжимаемые и растягиваемые элементы, где за отдельный элемент (сжимаемый или растягиваемый в приближении однородного одноосного напряжённо-деформированного состояния) примем имеющие одинаковые поперечные сечения части деталей из одного материала. Тогда условие совместности деформаций примет вид

$$\sum_i l_i(t) - \sum_j l_j(t) = \Delta(t) \cdot H(\Delta(t)), \quad (1)$$

где i и j – соответственно, растягиваемые и сжимаемые элементы; t – время процесса; H – функция Хевисайда, $H(x) = 0$ при $x < 0$, иначе $H(x) = 1$; l – длина соответствующего индексу элемента; Δ – величина зазора.

В истинных деформациях условие (1) примет вид

$$\sum_i l_{0i} \cdot e^{\varepsilon_i(t)} - \sum_j l_{0j} \cdot e^{\varepsilon_j(t)} = \Delta(t) \cdot H(\Delta(t)), \quad (2)$$

где l_0 – исходная длина элемента; ε – истинная (логарифмическая) относительная продольная деформация элемента.

В приближении малых деформаций данное условие будет иметь вид:

$$\sum_i l_{0i} \cdot (1 + \delta_i(t)) - \sum_j l_{0j} \cdot (1 + \delta_j(t)) = \Delta(t) \cdot H(\Delta(t)), \quad (3)$$

где δ – условная относительная продольная деформация элемента.

Выделим у каждого элемента термическую δ^T и механическую δ^M составляющие деформации. Чтобы избавиться от знаков? будем принимать напряжения и механические деформации всегда положительными. Тогда ввиду того, что в приближении одноосного напряжённо-деформированного состояния каждый элемент в течение всего процесса имеет неотрицательную деформацию линейного температурного расширения и является механически одноосно растягиваемым (δ^M) или сжимаемым ($-\delta^M$), и с учётом того, что $\sum_i l_{0i} - \sum_j l_{0j} = \Delta_0$ (где Δ_0 – начальный технологический зазор, имеющий в

случае начального зажима отрицательную величину), получим (здесь и далее под l будет подразумеваться l_0):

$$\Delta_0 + \sum_{\kappa=1}^N l_{\kappa} \cdot \delta_{\kappa}^M(t) = \Delta(t) \cdot H(\Delta(t)) + \sum_j l_j \cdot \delta_j^T(t) - \sum_i l_i \cdot \delta_i^T(t), \quad (4)$$

где N – общее количество элементов в схеме.

В дифференциальном виде (в скоростях деформаций) условие (4) примет вид

$$\sum_{\kappa=1}^N l_{\kappa} \cdot \dot{\delta}_{\kappa}^M(t) = \dot{\Delta}(t) \cdot H(\Delta(t)) + \sum_j l_j \cdot \dot{\delta}_j^T(t) - \sum_i l_i \cdot \dot{\delta}_i^T(t) \quad (5)$$

Тогда при величине зазора $\Delta(t) > 0$ получим

$$\sum_i l_i \cdot \dot{\delta}_i^T(t) - \sum_j l_j \cdot \dot{\delta}_j^T(t) + \sum_{\kappa=1}^N l_{\kappa} \cdot \dot{\delta}_{\kappa}^{pu}(t) = \dot{\Delta}(t) \quad (6)$$

Следует иметь в виду, что скорость обратимой реономной составляющей δ^{pu} может иметь ненулевое (отрицательное) значение при $\Delta > 0$ только в том случае, если имело место предшествующее нагружение.

При величине усилия $P(t) > 0$ имеем

$$\sum_{\kappa=1}^N l_{\kappa} \cdot \dot{\delta}_{\kappa}^M(t) = \sum_j l_j \cdot \dot{\delta}_j^T(t) - \sum_i l_i \cdot \dot{\delta}_i^T(t) \quad (7)$$

Тогда с учётом построенной модели термомеханического поведения материалов в условиях процесса диффузионной сварки [1, 2] выразим значения производных по времени зазора Δ и технологического усилия P (здесь все параметры, кроме геометрических, в общем случае являются функциями времени):

$$\dot{\Delta} = H(\Delta) \cdot \left(f1 - \sum_{\kappa} l_{\kappa} \cdot \lambda_{1\kappa} \cdot \delta_{\kappa}^{pu} \right) \quad (8)$$

$$\dot{P} = (1 - H(\Delta)) \cdot \frac{(P \cdot f2 - f4 - f1)}{f3} \quad (9)$$

Здесь:

$$f1 = \left(\sum_i l_i \cdot \alpha_i - \sum_j l_j \cdot \alpha_j \right) \cdot \dot{T} \quad (10)$$

$$f2 = \sum_{\kappa} \frac{l_{\kappa}}{S_{\kappa}} \cdot \begin{cases} \frac{(\alpha_{\kappa} - \beta_{\kappa}) \cdot S_{\kappa} \cdot \dot{T}}{P}, & \frac{P}{S_{\kappa}} = \rho_{\kappa} \text{ и } \frac{\dot{P}}{S_{\kappa}} > M_{\kappa} \\ \frac{\dot{E}_{\kappa}}{E_{\kappa}^2}, & \text{иначе} \end{cases} \quad (11)$$

$$f3 = \sum_{\kappa} \frac{l_{\kappa}}{S_{\kappa}} \cdot \begin{cases} \frac{1}{E_{\kappa}}, & \frac{P}{S_{\kappa}} = \rho_{\kappa} \text{ и } \frac{\dot{P}}{S_{\kappa}} > M_{\kappa} \\ \frac{1}{E_{\kappa}}, & \text{иначе} \end{cases} \quad (12)$$

$$f4 = \sum_{\kappa} l_{\kappa} \cdot \begin{cases} \lambda_{1\kappa} \cdot (\varphi_{1\kappa} - \delta_{\kappa}^{pu}) + \lambda_{2\kappa} \cdot (\varphi_{2\kappa} - q_{\kappa}) + \dot{\delta}_{y_{\kappa}}, & \varphi_{2\kappa} > q_{\kappa} \\ \lambda_{1\kappa} \cdot (\varphi_{1\kappa} - \delta_{\kappa}^{pu}) + \dot{\delta}_{y_{\kappa}}, & \text{иначе} \end{cases} \quad (13)$$

где T – температура (в приближении однородности температурного поля) ТСД; α – истинный температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР); E_{κ} – касательный модуль упрочнения при склерономном деформировании; β – коэффициент температурной податливости при склерономном деформировании; ρ и M – соответственно, параметр упрочнения при склерономном деформировании и его функция; δ^{pu} – обратимая составляющая реономной деформации (носящая ограниченный харак-

тер) – вязкоупругая деформация; δ^{pv} – необратимая ограниченная составляющая – вязкопластическая деформация; δ_y – неограниченная (носящая необратимый характер) – деформация установившегося течения; q – параметр упрочнения при реономном деформировании; λ и φ – соответственно, линейные коэффициенты состояний и предельные величины выше указанных ограниченных составляющих реономной деформации.

Анализ данных параметров материалов применительно к описываемой модели диффузионной сварки с ТСД приведён в упомянутых работах.

Сложность заключается в том, что ввиду статической неопределённости расчётной схемы при нахождении деформированных состояний на поверхности (точке) текучести одновременно у нескольких элементов (т.е. $P/S_{pl} = \rho_{pl}$, где $pl = 1, 2, \dots, n$ при $n > 1$) выполнение условия активного нагружения ($P/S_{pl} > M_{pl}$) в выражениях для определения f_2 и f_3 может быть взаимозависимым (коррелируемым) для нескольких элементов. В этом случае при $n \leq 10^1$ (что для используемых конструкций оснасток практически всегда соответствует действительности) достаточным для определения всех пластически активно деформируемых элементов является применение, как правило, не более трёхуровневой проверки условия нагружения.

Система обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, необходимая для определения $P(t)$, а также $\Delta(t)$ и составляющих деформирования элементов схемы через их скорости при заданных начальных условиях, представляет собой математическую модель для расчёта параметров технологического процесса диффузионной сварки с ТСД материалов. Решение данной системы возможно с применением численных методов.

Рассмотрим методику определения расчётных режимов технологического процесса диффузионной сварки с ТСД материалов. При определённом температурном режиме (в случае установок с радиационной системой нагрева – это обычно нагрев с максимальной скоростью до температуры диффузионного отжига, выдержка при данной температуре в течение времени, необходимого для прохождения последней стадии диффузионной сварки данных материалов, и отключение системы нагрева либо охлаждение по определённому режиму для предотвращения развития остаточных напряжений критического уровня) и различных величинах начального технологического зазора (зажима) Δ_0 (т.е. сдвига клиньев d_0) находятся численные решения разработанной математической модели. По полученным зависимостям $P(t)$ с учётом температурного режима $T(t)$, площади сварки $S_{св}$ и времени $t_a(p_a, T_a)$ (где p_a , t_a и T_a – соответственно, удельное усилие, время и температура его приложения при классической диффузионной сварке материалов соединяемых деталей) определяются приведённые (по t_a) расчётные удельное усилие p_p и температура его приложения T_p для каждого значения Δ_0 . Получаемая зависимость $p_p(T_p)$ сравнивается с зависимостью $p_a(T_a)$ при использованной для приведения величине t_a и устанавливается значение расчётного технологического зазора Δ_{op} (сдвига клиньев d_{op}). Например, для приведённых на рис. 1 случаев: 1 – $\Delta_{op1} > \Delta_{02}$; 2 – $\Delta_{op2} \in (\Delta_{03}, \Delta_{04})$; 3 – применяемые термокомпрессионное устройство и температурный режим не обеспечивают попадание значений параметров сварки в технологический объём (t_a ; p_a ; T_a) данных материалов ни при каких Δ_0 (d_0). Далее в случае 3 меняется конструкция термокомпрессионного устройства (или, если есть возможность, – температурный режим), а в случаях 1 и 2 при выбранном начальном технологическом зазоре (сдвиге клиньев) находится численное решение разработанной математической модели процесса с окончательным температурным режимом (в последний для выравнивания температурного поля в свариваемых заготовках и обезгаживания соединяемых поверхностей рекомендуется включить выдержку при постоянном значении температуры, при котором обнуляется начальный технологический зазор, т.е. $\Delta \rightarrow 0$ и $p = 0$). Если определённые по данным решения значения p_p и T_p попадают в технологическую область соединяемых материалов (т.е. точка Δ_{op1} в случае 1 или точка Δ_{op2} в случае 2 (см. рис. 1) находится выше кривой $p_a(T_a)$), то расчётные технологические параметры диффузионной сварки с ТСД соединяемых деталей (т.е. конструкция термокомпрессионного устройства, температурный режим и величина начального сдвига клиньев) являются установленными.

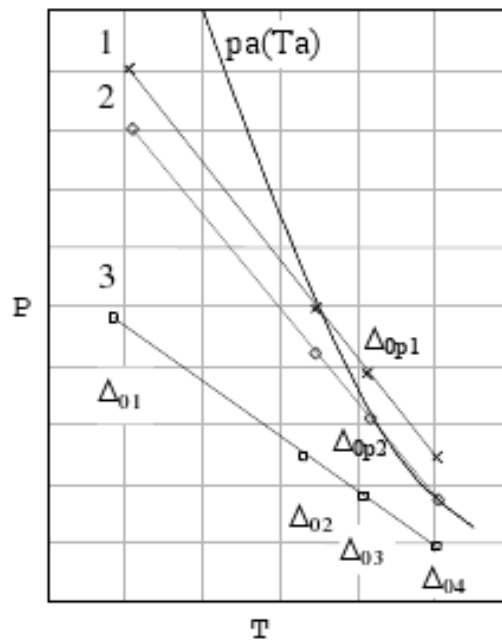


Рис. 1. Методика расчёта технологических режимов диффузионной сварки с ТСД

Вывод. Разработаны математическая модель и методика для определения технологических параметров диффузионной сварки с ТСД при известном режиме технологического процесса классической диффузионной сварки данных материалов. Использование данных разработок в производстве приведёт к повышению эффективности диффузионной сварки с ТСД за счёт снижения трудоёмкости разработки процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конюшков Г.В. Построение модели термомеханического поведения материалов в условиях процесса диффузионной сварки для компьютерного моделирования процесса / Г.В. Конюшков [и др.] // Компьютерные технологии в соединении материалов: тр. Первой Междунар. электрон. науч.-техн. конф. / ТулГУ. Тула, 2005.

2. Конюшков Г.В. Анализ параметров модели диффузионной сварки с термическими системами давления материалов электронного приборостроения / Г.В. Конюшков, А.П. Перекрёстов // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / СГТУ. Саратов, 2008.

Первозникова Яна Валерьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Yana V. Perevznikova – Ph.D., Associate Professor
Department of Welding and Metallurgy,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Перекрёстов Андрей Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Andrew P. Perekryostov – Ph.D., Associate Professor
Department Welding and Metallurgy,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Вавилина Надежда Александровна – доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Nadezhda A. Vavilina – Associate Professor
Department Welding and Metallurgy,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.02.15, принята к опубликованию 11.05.15

И.А. Скляр, О.В. Захаров

ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ АБРАЗИВНО-СТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ

Представлены результаты опытно-промышленных испытаний установки для абразивно-струйной обработки внутренних поверхностей. Проведенные в условиях ОАО «Саратовгордиагностика» испытания показали, что предварительная абразивно-струйная обработка труб способствует повышению эффективности последующей диагностики дефектов различного характера.

Абразивно-струйная обработка, промышленные испытания, внутренние поверхности, диагностирование, дефектоскопия

I.A. Sklyarov, O.V. Zakharov

PILOT-SCALE TESTS FOR ABRASIVE BLAST CLEANING UNITS

The paper deals with the results of pilot-scale testing of units designed for abrasive blast cleaning of interior surfaces. The tests conducted by OAO «Saratovgor Diagnostika» showed that pre-abrasive blasting of tubes enhances effectiveness of their subsequent diagnosis for various defects.

Abrasive blast cleaning, pilot-scale testing, internal surfaces, diagnosing, flaw detection

В процессе эксплуатации трубопроводов необходимо проведение периодической диагностики для контроля технического состояния и своевременного устранения дефектов и повреждений, возникающих при эксплуатации или постороннем воздействии. Наиболее эффективным методом контроля технического состояния будет внутритрубная инспекция на основе пропуски внутри трубопровода диагностических снарядов. В качестве диагностического метода в настоящее время используют два метода неразрушающего контроля: ультразвуковой и магнитный [1, 2]. Для труб с внутренним покрытием и защищенными сварными швами применение ультразвукового метода проблематично, так как возникает дополнительное рассеяние и поглощение ультразвукового сигнала на внутреннем покрытии, что снижает точность измерений и затрудняет обработку данных. В зоне сварного соединения при наличии защитной втулки не представляется возможным проконтролировать состояние внутренней поверхности трубы, экранированной защитной втулкой. Поэтому более перспективным следует считать метод магнитной дефектоскопии.

Обязательным условием для запуска снаряда – магнитного дефектоскопа – является очистка и осушка трубы. Для этого применяют предварительный запуск очистного снаряда, в котором реализуется механический способ очистки системой скребков. Однако качество очистки не всегда получается удовлетворительным. В результате эффективность дефектоскопии также снижается. В связи с этим предложено использовать в качестве подготовительной операции абразивно-струйную очистку внутренней поверхности труб.

В настоящее время окончательная обработка преимущественно производится с применением абразивных инструментов или сред. К методам обработки деталей свободным абразивом относят [3]: вибрационную обработку, центробежно-ротационную обработку, струйно-абразивную обработку, турбоабразивную обработку, обработку свободным абразивом, уплотненным инерционными силами, магнитно-абразивное полирование и галтовку. Классифицировать методы обработки свободными абразивами в зависимости технологических параметров можно по ряду признаков: типу абразивной среды, необходимости закрепления заготовок, главному движению, количеству одновременно обрабатываемых заготовок, характеру воздействия инструмента, направлению следов обработки.

Способ объемной центробежно-ротационной обработки [4] заключается в том, что гранулированная обрабатываемая среда и заготовки приводятся во вращение вокруг вертикальной оси таким образом, что приобретает форму тора, в котором частицы движутся по спиральным траекториям. Обрабатываемые заготовки загружаются в рабочую камеру «внавал» и перемещаются вместе с рабочей средой. Съем металла осуществляется за счет относительного перемещения и взаимодействия абразивных гранул и заготовок, смачиваемых жидкостью, непрерывно подаваемой в рабочую камеру.

Одним из перспективных является метод струйно-абразивной обработки, сущность которого заключается в использовании эффекта удара частиц обрабатываемого материала об обрабатываемую поверхность. Физическая картина процесса аналогична изнашиванию материалов, находящихся под действием потока частиц [10-12]. Обладая кинетической энергией и, соударяясь, происходит пластическая деформация элементарных участков и съем некоторых частиц металла. Кроме съема металла с поверхности, наблюдается ее упрочнение и изменение микрогеометрии, а в тонких поверхностных слоях возникают остаточные напряжения сжатия. Другая разновидность метода – турбоабразивная обработка основана на использовании техники псевдооживления сыпучих материалов и заключается в создании абразивного кипящего (псевдооживленного) слоя, в который помещают обрабатываемую деталь, задавая в зависимости от ее формы различные виды движения.

Основные параметры, которыми характеризуется абразивно-струйная обработка, следующие: длина струи (расстояние от поверхности до среза); физико-механические свойства и зернистость абразива; сила и скорость соударения (определяемая давлением воздуха); угол, образующийся с обрабатываемой поверхностью; конфигурация сопел.

Методы обработки свободными абразивами имеют общие особенности, основные из которых следующие:

- 1) отсутствие жесткой кинематической связи инструмента и заготовки;
- 2) низкотемпературный характер обработки;
- 3) возможность обработки заготовок сложной формы;
- 4) «безразмерный» характер обработки;
- 5) повышение микротвердости поверхностного слоя после обработки.

Основной недостаток абразивно-струйной обработки связан со сложностью технологического процесса. Для того чтобы достичь заданных параметров качества и равномерности, используются специализированные громоздкие аппараты. Также в процессе обработки необходимо участие оператора. Несмотря на указанный недостаток, данный метод позволяет добиться микрорельефа с минимальной шероховатостью и максимальной микротвердостью. Это особенно важно при производстве и обработке изделий, которые работают в условиях высокого давления и ограниченной смазки [5-9]. Под действием большого сжимающего напряжения (от 40 до 500 МПа) поверхность приобретает более высокую усталостную долговечность. На ней не остается грубых неровностей, которые зачастую становятся концентраторами напряжения. Обработанная поверхность обладает шероховатостью Ra от 0,16 до 0,02 мкм. Также абразивно-струйная обработка относится к безразмерным методам, так как не способна изменить линейные размеры и конфигурацию детали.

Обработка внутренних цилиндрических поверхностей имеет ряд сложностей, связанных с ограниченным доступом в зону обработки, а также с обеспечением высокой производительности и экономичности. Предложен способ абразивно-струйной обработки, в котором реализуется постоянная циркуляция абразивной смеси внутри закрытой рабочей зоны. При этом сопла располагают симметрично по центру рабочей зоны (рис. 1). Сжатый воздух в рабочую зону подают через одну из заслонок под давлением через стержень, штуцер и шланг от источника воздуха, например, компрессора. Величину давления сжатого воздуха выбирают в зависимости от диаметра обрабатываемой поверхности и требуемой производительности обработки из диапазона 5-10 ат. Циркуляция абразивно-воздушной смеси внутри герметичной рабочей зоны, возможность изменения давления и применение нескольких сопел для подачи сжатого воздуха под давлением способствуют повышению производительности обработки.

Особенность предложенного способа также заключается в том, что образование абразивно-воздушной смеси осуществляют непосредственно в рабочей зоне обработки путем смешивания абразивного материала и сжатого воздуха, тем самым предохраняя от изнашивания элементы пескоструйной установки и обеспечивая экономичность обработки.



Рис. 1. Установка для абразивно-струйной обработки

Обработку протяженных цилиндрических поверхностей по всей длине, например, магистральных трубопроводов выполняют перемещением герметичной рабочей зоны вдоль обрабатываемой поверхности. Герметичная рабочая зона образуется конструктивно двумя заслонками круглой формы, жестко насаженными на полый стержень. Сжатый воздух подают под давлением от источника энергии через одну из заслонок. Для обеспечения герметичности рабочей зоны заслонки круглой формы выполняются из эластичного материала или могут быть снабжены уплотнениями по периферии.

Технический результат предложенной схемы абразивной обработки заключается в повышении производительности и экономичности обработки внутренних поверхностей крупногабаритных заготовок за счет создания герметичной рабочей зоны, в которой постоянно циркулирует абразивно-воздушная смесь. Основной проблемой при реализации рассмотренной схемы обработки будет обеспечение заданного объема снимаемого материала в единицу времени. Варьируемыми параметрами, помимо времени обработки, являются давление воздуха и характеристики абразивного материала.

Испытания на стенде ЮКЕД 4.136.013 Ду273 опытного образца устройства для очистки внутренних поверхностей трубы согласно требованиям РД 03-606-03; СНиП 2.05.06-85 проводились в следующей последовательности:

- 1) определение марки стали и анализ химического состава трубы $\varnothing 273$ мм для определения твердости металла;
- 2) измерение твердости металла трубы в зоне прохождения (измерительное оборудование – твердомер динамический малогабаритный ТДМ-3);
- 3) выявление скрытых дефектов на внутренней поверхности трубы методом визуально-инструментального контроля (ВИК);
- 4) протяжка дефектоскопа продольного намагничивания МД-273 с целью выявления скрытых дефектов на внутренней поверхности трубы до испытаний;
- 5) осушка внутренней поверхности трубы сжатым воздухом;
- 6) прохождение установки для абразивно-струйной обработки;
- 7) подтверждение скрытых дефектов методом ВИК;
- 8) измерение твердости металла трубы после прохождения установки для абразивно-струйной обработки;
- 9) протяжка дефектоскопа продольного намагничивания МД-273 с целью выявления скрытых дефектов на внутренней поверхности трубы после испытаний;
- 10) анализ данных и выдача заключения о прохождении дефектоскопа продольного намагничивания МД-273 до и после испытаний установки для абразивно-струйной обработки.

Обследовались две сваренные между собой трубы $\varnothing 273$ мм из стали 20. Труба 1 имела длину 5,09 м с толщиной стенки 9 мм, труба 2 – длину 0,57 м с толщиной стенки 11,6 мм. Диагностическое обследование проводилось снарядами-дефектом с системой продольного намагничивания высокого разрешения для обнаружения и определения размеров дефектов потери металла, трещин любой ориентации в сварных соединениях и металле труб, дефектов сварных швов.

При абразивно-струйной обработке использовался абразивный порошок марки 2 (0,5-3 мм) ТУ 3989-003-82101794-2008 завода UralGRIT. Давление, создаваемое компрессором, составляло 5-6 атм. Время

обработки составило 50 с. Проводилось измерение микротвердости в 4 сечениях трубы. Установлено, что после абразивно-струйной обработки микротвердость повысилась в среднем с 138 до 144 НВ.

В результате пропуска снаряда-дефектоскопа и обработки полученной информации на первой трубе были обнаружены следующие дефекты (табл. 1, рис. 2а). На второй трубе дефектов не обнаружено.

Таблица 1

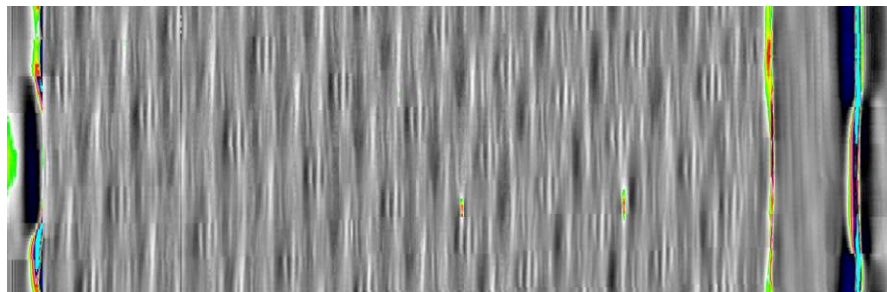
Протокол дефектоскопии трубы до прохождения установки абразивно-струйной обработки

№ в ТМА	№ трубы	Дистанция, мм	Наименование дефекта	Длина, мм	Ширина, мм	Тип дефекта	Примечание
2	1	5368	мех. повреждение	14	36	наружная	
3	1	5696	мех. повреждение	22	63	наружная	
4	1	6140	мех. повреждение	24	54	наружная	раковина 7 мм
5	1	6720	мех. повреждение	28	54	наружная	раковина 3 мм
6	1	7216	мех. повреждение	24	71	наружная	раковина 4 мм

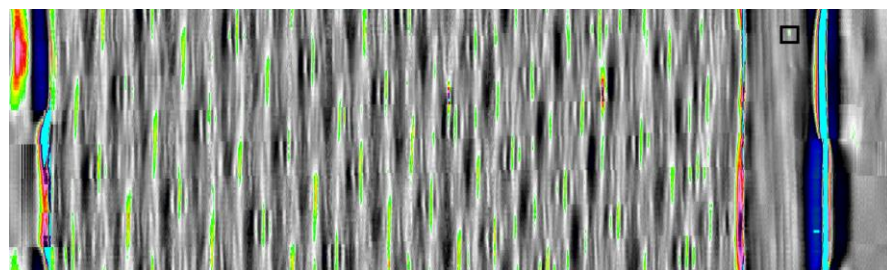
Таблица 2

Протокол дефектоскопии трубы после прохождения установки абразивно-струйной обработки

№ в ТМА	№ трубы	Дистанция, мм	Наименование дефекта	Длина, мм	Ширина, мм	Тип дефекта	Примечание
2	1	5368	мех. повреждение	14	36	наружная	
3	1	5696	мех. повреждение	22	63	наружная	
4	1	6140	мех. повреждение	24	54	наружная	раковина 7 мм
5	1	6720	мех. повреждение	28	54	наружная	раковина 3 мм
6	1	7216	мех. повреждение	24	71	наружная	раковина 4 мм
7	2	8524	мех. повреждение	30	2	внутренний	



а



б

Рис. 2. Результаты дефектоскопии трубы: а – до прохождения установки абразивно-струйной обработки, б – после прохождения установки абразивно-струйной обработки

После пропуска снаряда дефектоскопа, просмотра и проведения анализа записи была проведена очистка полости трубы установкой абразивно-струйной обработки. Очистные элементы установки выполнены из износостойкого материала и сохраняют работоспособность изделий при проведении очистки внутренней полости трубы в режиме «сухого» трения. После пропуска очистного оборудования был повторно пропущен снаряд-дефектоскоп для подтверждения обнаруженных дефектов,

а также для возможного обнаружения новых дефектов. Результаты пропуска представлены в табл. 2 и на рис. 2б. Из приведенных данных видно, что предварительная очистка позволила повысить качество диагностирования, в результате чего был дополнительно обнаружен внутренний дефект на второй трубе.

Таким образом, качество очистки с помощью установки абразивно-струйной обработки обеспечивает надежность получения диагностической информации, увеличивает качество записи, способствует более точной идентификации дефектов различной природы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Применение электромагнитного акустического метода в практике контроля состояния труб магистральных газопроводов / В.В. Лопатин, С.Э. Попов, В.А. Канайкин, А.Ф. Матвиенко // Дефектоскопия. 2008. № 7. С. 3-11.
2. Гольдштейн А.Е. Метод вихретоковой дефектоскопии прутков и труб на основе использования комбинированного преобразователя с возбуждением разночастотных пространственных компонент магнитного поля / А.Е. Гольдштейн, В.Ф. Булгаков, Х.-М. Кренинг // Дефектоскопия. 2011. № 11. С. 39-47.
3. Повышение эффективности центробежно-ротационной обработки в среде абразива / М.А. Тамаркин, Э.Э. Тищенко, Ю.В. Корольков, О.А. Рожненко // СТИН. 2009. № 2. С. 26-30.
4. Зверовщиков В.З. Повышение эффективности объемной центробежной отделочно-упрочняющей обработки деталей в контейнерах с планетарным вращением / В.З. Зверовщиков, А.Е. Зверовщиков, Е.А. Зверовщиков // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 12. С. 3-7.
5. Иванова Т.Н. Исследование физико-механических свойств стали 8ХФ после высокоскоростного термического процесса / Т.Н. Иванова, В.Б. Дементьев // Химическая физика и мезоскопия. 2013. Т. 15. № 4. С. 589-597.
6. Севостьянов А.С. Современное состояние исследований в области нанесения микрорельефа в отечественной науке / А.С. Севостьянов, А.А. Лукьянов, И.Н. Бобровский // Theoretical & Applied Science. 2014. № 10 (18). С. 82-84.
7. Шрубченко И.В. Оптимизация режимов резания для обработки поверхностей качения опор технологических барабанов / И.В. Шрубченко, В.Ю. Рыбалко // Технология машиностроения. 2013. № 8. С. 12-16.
8. Тюрин А.Н. Энергия взаимодействия инструмента и заготовки при суперфинишировании / А.Н. Тюрин, А.В. Королев, А.А. Королев // Вестник СГТУ. 2007. Т. 1. № 4. С. 71-80.
9. Новичков С.В. Влияние изменения условий функционирования на эксергетическую эффективность ПГУ – ТЭЦ / С. В. Новичков, Т. И. Попова // Промышленная энергетика. 2011. № 5. С. 35-37.
10. Ghobeity A. An analytical model of the effect of particle size distribution on the surface profile evolution in abrasive jet micromachining / A. Ghobeity, D. Ciampini, M. Papini // Journal of Materials Processing Technology. 2009. Vol. 209. No. 20. P. 6067-6077.
11. D. Waterjet and abrasive waterjet surface treatment of titanium: a comparison of surface texture and residual stress / Arola, M.L. McCain, S. Kunaporn, M. Ramulu // Wear. 2002. Vol. 249. P. 943-950.
12. Borkowski P. Abrasive grains distribution in high-pressure abrasive-water jet used for surface treatment / P. Borkowski // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2009. Vol. 9. Issue 3. P. 5-16.

Скляр Игорь Анатольевич – аспирант кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Igor A. Sklyarov – Postgraduate Department of Technical and Technological Complexes Design Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Захаров Олег Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Oleg V. Zakharov – Dr. Sc., Professor Department of Technical and Technological Complexes Design Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.03.15, принята к опубликованию 11.05.15

Л.И. Шейко, С.Я. Приказчиков

ОСНОВНЫЕ КЛАССИФИКАЦИОННЫЕ ПРИЗНАКИ И КЛАССИФИКАЦИЯ МНОГОКООРДИНАТНЫХ ЗУБООБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКОВ

Определены основные классификационные признаки, введены категории исполнительных органов и выполнена классификация многокоординатных зубообрабатывающих станков для конических и гипоидных передач по типам, классам и группам.

Зубообработка, множество, признак, классификация, станок, компоновка, координаты, шпиндель, управляемые движения

L.I. Sheyko, S.I. Prikazchikov

BASIC CLASSIFICATION CHARACTERISTICS AND CLASSIFICATION OF MULTIAXIAL GEAR CUTTING MACHINES

The basic classification characteristics and classification of the multi-axis gear cutting machines used for bevel and hypoid gear are defined and performed by their types, classes and groups, as well as the various categories of executive bodies are introduced.

Gear cutting process, variety, sign, classification, gear cutting generator, arrangement, axes, spindle, controlled movements

Современные многокоординатные зубообрабатывающие (МЗС) станки для конических и гипоидных передач разрабатываются на следующих основных принципах, сформулированных в [1-3]:

- полное совмещение наладочных и формообразующих движений;
- наличие в МЗС шести исполнительных органов, из которых три задают относительное угловое положение инструмента и обрабатываемого изделия и три – текущие координаты определенных точек осей вращения инструмента и изделия;
- оснащение каждого исполнительного органа отдельным приводом, управляемым микропроцессорной системой ЧПУ;
- одновременное управление в общем случае 6-ю формообразующими движениями по нелинейным законам.

При этом на МЗС могут быть реализованы практически любые относительные движения инструмента и изделия, то есть обеспечивается обработка любых (в пределах характеристик МЗС) зубчатых колес, любыми методами зубообработки. Реализация относительных движений может быть выполнена различными как по виду движения, так и по пространственной ориентации, исполнительными органами. Число возможных компоновок МЗС может составлять более 300 тысяч.

Для систематизации всего множества компоновок необходимо определить основные классификационные признаки и их основе выполнить классификацию МЗС, которая позволит установить общие закономерности выбора наиболее рациональных компоновок.

Указанные выше 6 исполнительных органов (ИО) условно разделим на две категории.

К первой отнесем три вращательно подвижных ИО – шпиндель инструмента с вращением B_1 , шпиндель изделия с вращением B_2 и ИО, изменяющий угол η между осями вращения указанных шпинделей и выполняющий угловое перемещение B_3 . Эти вращения задают относительное угловое положение шпинделей инструмента и изделия.

Во вторую категорию входят также три подвижных ИО, движение которых задают текущие координаты определенных точек, расположенных на осях вращения шпинделей инструмента и изделия. Эти движения могут быть как прямолинейными, так и вращательными.

В качестве *первого классификационного признака*, оказывающего наиболее существенное влияние на конструкцию и характеристики МЗС – диапазоны и законы движения ИО, удобство смены заготовки и инструмента, а также обслуживания и другие, примем расположение относительно стационарного блока

(станины) исполнительного органа, задающего поворотом B_3 угол η между осями вращения шпинделей инструмента и изделия. Возможно два варианта расположения этого ИО. При первом варианте ИО выполняющий поворот B_3 , расположен между станиной и шпинделем изделия, и в этом случае свое направление изменяет ось вращения шпинделя изделия, а при втором варианте – между станиной и шпинделем инструмента, и свое направление изменяет ось вращения шпинделя инструмента. Обозначим:

S – ось вращения шпинделя инструмента или изделия, не изменяющая своего направления;

R – ось вращения шпинделя инструмента или изделия, изменяющая свое направление;

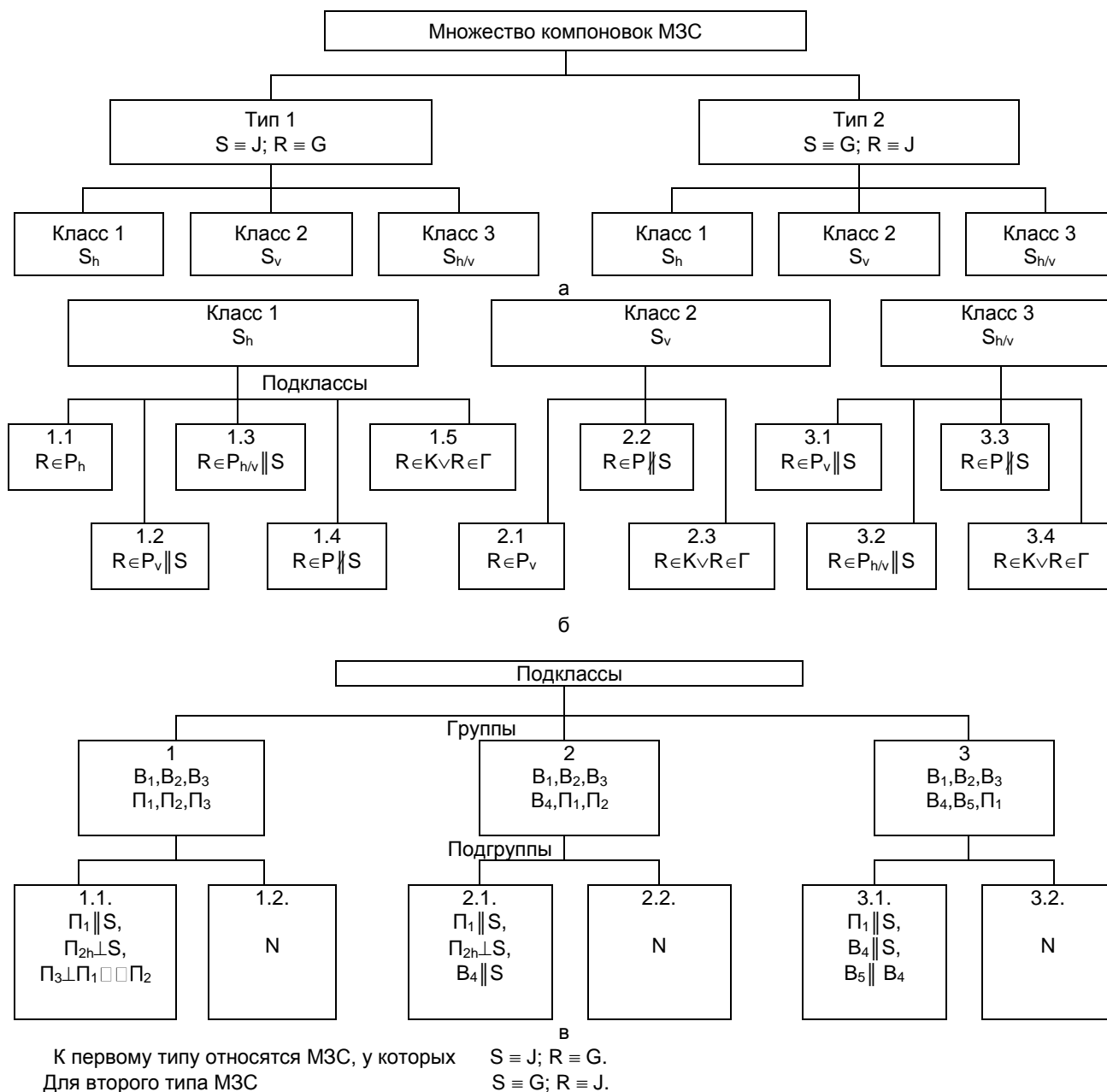
G – ось вращения шпинделя изделия;

J – ось вращения шпинделя инструмента.

Итак, в соответствии с указанным классификационным признаком все множество компонок разделяется на два типа (табл. 1а).

Таблица 1

Классификационная схема МЗС



Одной из важнейших характеристик МЗС является ориентация в пространстве осей S и R , от которой в значительной степени зависят удобство ручной и автоматизированной смены инструмента и обрабатываемого изделия, эффективность формирования и удаления стружки при лезвийной обработке, а также возможность унификации шпиндельных узлов. Это является вторым классификационным признаком.

В зависимости от ориентации оси S каждый из типов подразделяется на *три класса*, указанные в табл. 1а), где обозначены:

S_h – ось шпинделя S расположена горизонтально;

S_v – ось шпинделя S расположена вертикально;

$S_{h/v}$ – ось шпинделя S расположена наклонно.

Как видно из табл. 1а, деление на классы одинаково для первого и второго типа МЗС.

Поворот B_3 исполнительного органа, изменяющего угол η между осями J и G , осуществляется вокруг определенной оси, которую обозначим D , причем для изменения указанного угла η ось D должна быть непараллельной осям S и R . В известных компоновках МЗС ось R при своем движении вокруг оси D описывает или некоторую плоскость P [2, 3], или конус K [2].

В первом случае ось поворота D перпендикулярна к оси R и если к тому же ось D перпендикулярна и оси S , то описываемая плоскость P параллельна оси S . Однако, плоскость P всегда перпендикулярна к оси S .

Во втором случае, когда ось R описывает конус K , ось вращения D перпендикулярна R и пересекается с ней. Если ось D не пересекается с осью R , то при своем движении ось R описывает однополостный гиперboloид Γ .

Ориентация указанных поверхностей в пространстве определяет возможные положения оси R во время зубопрофилирования и смены инструмента или обрабатываемого изделия. Это принято в качестве *третьего классификационного признака*.

В зависимости от вида поверхности, которую образует ось R при своем движении вокруг оси D , а также от ориентации этих поверхностей в пространстве, классы делятся на *подклассы*, представленные в табл. 1б. Это подразделение, как и все последующие, также являются общими для первого и второго типа МЗС.

В табл. 1 б введены следующие обозначения:

$R \in P_h$ – ось R при своем движении описывает плоскость P , расположенную горизонтально;

$R \in P_v \parallel S$ – ось R при своем движении описывает плоскость P , расположенную вертикально, параллельно оси блока S ;

$R \in P_{h/v} \parallel S$ – ось R при своем движении описывает плоскость P , расположенную наклонно, параллельно оси блока S ;

$R \in P \parallel S$ – ось R при своем движении описывает плоскость P , не параллельную оси блока S ;

$R \in K \vee R \in \Gamma$ – ось R при движении описывает конус K или однополостный гиперboloид Γ ;

$R \in P_v$ – ось R при своем движении описывает плоскость P , расположенную вертикально.

В подклассах, где ось R образует плоскость P , ориентация этой плоскости определяет направление оси поворота D . Так, в компоновках подкласса 1.1 ось поворота D расположена вертикально, подклассов 1.2, 2.1, 3.1 – горизонтально, а подклассов 1.3, 3.2 – наклонно. В МЗС, в которых плоскость P параллельна оси S (это подклассы 1.1, 1.2, 1.3, 2.1, 3.1, 3.2) угол η между осями J и G устанавливается непосредственно.

В МЗС остальных подклассов (1.4, 1.5, 2.2, 2.3, 3.3, 3.4) не столь очевидно влияние пространственной ориентации поверхностей, образуемых осью R при повороте вокруг оси D , на свойства компоновок. Поэтому в зависимости от указанного признака данные МЗС не классифицировались. Во всех этих МЗС угол η между осями J и G связан с углом поворота вокруг оси D через тригонометрические функции углов и диапазон изменения этого угла ограничен. В частности для МЗС, в которых ось R описывает конус K или однополостный гиперboloид Γ (это подклассы 1.5, 2.3, 3.4), диапазон изменения угла η равен 2τ , где τ – острый угол между осями R и D . Поскольку для этих МЗС $\tau < 90^\circ$, диапазон изменения угла η между осями R и S меньше 180° . Однако при сохранении диапазона 2τ , предельные значения угла η могут быть любыми, в зависимости от угла между осями S и D .

Для МЗС, в которых ось R образует плоскость P , не параллельную оси блока S (подклассы 1.4, 2.2, 3.3), угол η между осями J и G изменяется в пределах: $\psi \leq \tau \leq 180 - \psi$, где ψ – острый угол между осью S и плоскостью P . Очевидно, что параллельная установка осей блоков S и R здесь невозможна, что ограничивает применение таких МЗС.

Четвертый классификационный признак связан со способами осуществления трех движений второй категории. По этому признаку каждый подкласс подразделяется на *три группы* (табл. 1в):

– в первой группе все три ИО совершают прямолинейные движения Π_1, Π_2, Π_3 по трем непараллельным направлениям, не лежащим в одной плоскости;

– во второй группе один ИО выполняет вращательное движения B_4 вокруг оси, не совпадающей с осями S и R , например, как эксцентриковый барабан традиционных станков, а два других пере-

мещаются прямолинейно по непараллельным направлениям (движения Π_1, Π_2), причем одно из этих перемещений должно быть перпендикулярно к оси вращения B_4 ;

– в третьей группе два ИО выполняют вращательные движения B_4, B_5 вокруг осей, не совпадающих друг с другом и с осями S и R , например как эксцентриковый барабан и люлька в станках традиционных компоновок, а третий – совершает прямолинейное движение Π_1 , перпендикулярное к одной из осей вращения B_4 или B_5 .

Возможны и другие составы движений для этой категории, например все три ИО могут выполнять вращения вокруг соответствующих осей, однако при этом габарит и металлоемкость МЗС значительно увеличатся. Поэтому такие компоновки МЗС не рассматриваются.

Таким образом, общее число вращательных B и прямолинейных Π движений в различных группах МЗС будет следующим:

- для МЗС первой группы $B = 3, \Pi = 3$;
- для МЗС второй группы $B = 4, \Pi = 2$;
- для МЗС третьей группы $B = 5, \Pi = 1$.

Указанные выше три движения второй категории могут быть ориентированы в пространстве и относительно оси S различным образом. Это является *пятым классификационным признаком*. В зависимости от этого каждая группа МЗС разделяется на *две подгруппы* (табл. 1в). В табл. 1в обозначены:

$\Pi_1 \parallel S$ – прямолинейное движение Π_1 параллельно оси S ;

$\Pi_{2h} \perp S$ – прямолинейное движение Π_{2h} является горизонтальным и направлено перпендикулярно оси S ;

$\Pi_3 \perp \Pi_1 \wedge \Pi_2$ – прямолинейное движение Π_3 перпендикулярно движениям Π_1 и Π_2 ;

$B_4 \parallel S$ – ось вращения B_4 параллельна оси S ;

$B_5 \parallel B_4$ – оси вращения B_5 и B_4 параллельны;

N – компоновки вторых подгрупп (1.2, 2.2, 3.2), в которых не выполняется хотя бы одно из условий, предъявляемых к МЗС соответствующих первых подгрупп (1.1, 2.1, 3.1).

Дальнейшая классификация МЗС может осуществляться в зависимости от порядка сопряжения подвижных блоков друг с другом и со стационарным блоком, вида направляющих и других признаков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сегаль М.Г. Основные принципы проектирования многокоординатных зубообрабатывающих станков / М.Г. Сегаль, Л.И. Шейко // СТИН. 1998. № 4. С. 6-8.
2. Шейко Л.И. Структурный синтез компоновок многокоординатных зубообрабатывающих станков для изготовления конических и гипоидных передач / Л.И. Шейко // СТИН. 2001. № 3. С. 6-10.
3. Шейко Л.И. Законы движения исполнительных органов многокоординатных зубообрабатывающих станков / Л.И. Шейко, С.Я. Приказчиков // СТИН. 2003. № 6. С. 15-20.

Шейко Леонид Иванович –
доктор технических наук, профессор,
главный специалист
ООО Фирма «Саратовгазприборавтоматика»

Leonid I. Sheyko –
Dr. Sc., Professor,
Chief Specialist
ООО «Saratovgazpriboravtomatika»

Приказчиков Сергей Яковлевич –
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Проектирование технических
и технологических комплексов» Саратовского
государственного технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Sergey Ya. Prikazchikov –
Ph. D., Associate Professor,
Department of Technical
and Technological Complexes Design,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.03.15, принята к опубликованию 11.05.15

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.37/.39;621.38;621.37;621.39

И.В. Бороденкова, В.А. Царев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИОДНОЙ ЧАСТИ МОЩНОГО МНОГОЛУЧЕВОГО КЛИСТРОДА-УМНОЖИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Предложены приближенные математические модели для описания процессов модуляции электронов по плотности. Проведенное с их помощью математическое моделирование позволило определить выходные параметры и характеристики многолучевого клистрода-умножителя частоты. Показано, что такой прибор позволяет на частоте 2,45 ГГц получить выходную мощность около 80 кВт и КПД не менее 50%. Он может использоваться в устройствах промышленного СВЧ нагрева.

Клистрод, умножитель частоты, электронная пушка, СВЧ нагрев, численное моделирование, анодно-сеточная характеристика

I.V. Borodenkova, V.A. Tsarev

SIMULATING THE CHARACTERISTICS OF THE TRIODE PART FOR A POWERFUL MULTI-BEAM KLYSTRODE-FREQUENCY MULTIPLIER

The paper presents the approximate mathematical models used to describe the microwave modulation of electron density. The mathematical simulation conducted using the modulations allowed for the definition of the output parameters and characteristics of the multi-beam klystron-frequency tripler. It is shown that the device produces the output power of about 80 kW at the frequency around 2.45 GHz, and the efficiency at least 50%. The device can be used in the systems applied for industrial microwave heating.

Klystron, a frequency multiplier, an electron gun, microwave heating, numerical modeling, the anode-grid characteristic

Наблюдаемый в последние годы прогресс в разработке мощных гибридных СВЧ приборо-клистронов открывает широкие перспективы их применения в телевидении и СВЧ энергетике [1]. Клистрод является гибридом СВЧ триода и клистрона. Многолучевые клистроны (МЛКД) [2] обладают рядом преимуществ по сравнению с однолучевыми приборами этого класса. Они имеют более низкие рабочие напряжения, высокий электронный КПД, малые габариты и массу. В этих приборах остаточная энергия отработанного электронного пучка рассеивается в коллекторе, а не в аноде, как в триодах и тетрадах. Эта особенность конструкции МЛКД позволяет достичь очень высоких уровней выходной мощности (до 70-100 кВт) при высокой надежности и долговечности прибора. Продвижение этих гибридных приборов в сторону более коротких волн сдерживают технологические проблемы, связанные с необходимостью приближения мелкоструктурной сетки к катоду. Считается, что в настоящее время предельная рабочая частота клистрода около 1.2 ГГц. Однако в режиме умножения частоты многолучевой клистрод с дополнительным промежуточным резонатором (тристрод) [3] при работе в режиме с отсечкой катодного тока в классе «С» может быть использован и на более высоких частотах, в частности на промышленной частоте 2.45 ГГц. В этом режиме первичное формирование электронных сгустков в триодной части и их догруппировка в промежуточном резонаторе будут проходить на частоте $f=816.7$ МГц, а отбор энергии в выходном зазоре на частоте kf , где $k=3$ -коэффициент умножения. Сегодня на этой частоте, как правило, работают магнетроны с выходной мощностью до 10-15 кВт. Однако для ряда промышленных применений СВЧ энергии, например для

передачи энергии на расстояние, для сушки бетонных плит, кирпичей, древесины, для разрушения твердых пород и в других случаях требуется уровень выходной мощности порядка 50-100 кВт. В этой связи представляет интерес исследование возможности создания для промышленных нужд многолучевого тристрода-умножителя с выходной мощностью выше 50 кВт и КПД не менее 50%.

Целью настоящей работы является оценка выходных характеристик мощного умножителя частоты на многолучевом клистроне с рабочей частотой 2450 МГц.

Основная задача, которую нужно решить при проектировании КСУ клистрона, выбор оптимальных значений параметров анодно-сеточной характеристики, таких как потенциал запирания, напряжение смещения, амплитуда модулирующего напряжения, крутизна.

За основу для проектирования был взят КСУ, разработанный ранее для телевизионного многолучевого клистрона [4]. Он имеет следующие параметры. Сетка изготовлена из молибдена и имеет сферическую форму с квадратными ячейками. Она характеризуется следующими параметрами: толщина сетки – 0.15 мм, размер ячейки – 0.66 мм; ширина перемычки – 0.12 мм; радиус кривизны катодной сферы – 15.8 мм; диаметр катода – 19 мм; диаметр сеточного полотна – 19.6 мм; расстояние «катод-сетка» – 0.3 мм. Радиус пролетного канала был выбран равным $a = 0.75$ мм.

Для расчета анодно-сеточных характеристик использовался анализ траекторий электронов с помощью двумерной программы численного моделирования электронных пушек с сеточным управлением «Кит», разработанной в СГТУ [4]. По полученным расчетным данным были построены анодно-сеточные характеристики для трех разных ускоряющих напряжений ($U_a = 18$ кВ, $U_a = 30$ кВ, $U_a = 40$ кВ). Эти характеристики приведены на рис. 1.

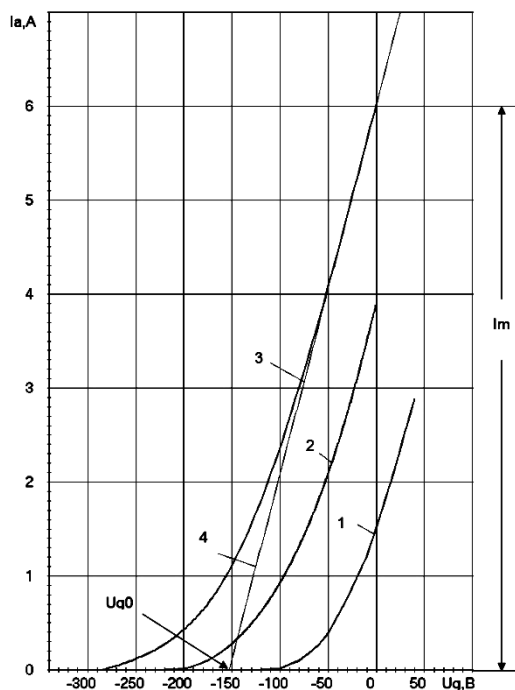


Рис. 1. Анодно-сеточные характеристики для разных анодных напряжений:
1- $U_a=18$ кВ, 2- $U_a=30$ кВ, 3- $U_a=40$ кВ, 4-аппроксимация

Величину ускоряющего напряжения можно определить, если задаться приведенным радиусом пролетного канала трубы $\gamma a \cong 1$, где $\gamma = 3176 / \lambda \sqrt{U_a}$, $\lambda = 12.54$ – длина волны, см. Выберем $\gamma a = 0.97$, тогда $U_a = 40$ кВ. Поэтому в качестве рабочей характеристики была выбрана кривая 3, соответствующая 40 кВ.

Обычно при расчете приборов с сеточным управлением считают, что крутизна анодно-сеточной характеристики $S = dI_a / dU_g$ постоянна, что соответствует ее линейной аппроксимации. По рис. 2 можно путем линейной аппроксимации (прямая линия – 4) приближенно определить крутизну характеристики $S = dI_a / dU_g = 32.7$ mA/V^{3/2}.

Тогда выражение для импульсов тока, формируемых триодной частью, будет иметь следующий вид:

$$i(\omega t) = I_m \frac{\cos \omega t - \cos \Theta}{1 - \cos \Theta},$$

где I_m – максимальный импульс тока при напряжении на сетке, равном нулю, Θ – угол отсечки катодного тока, ω – круговая частота, t – время.

Амплитуду напряжения возбуждения U_{mg} можно приближенно определить [5], задаваясь величиной угла отсечки, который для максимума третьей гармоники конвекционного тока примерно равен 40° : $U_{mg} = \frac{I_m}{S(1 - \cos \Theta)} = \frac{6000}{32.7 \cdot (1 - \cos(40^\circ))} = 784$ В.

По полученным данным были построены импульсы катодного тока (рис. 3).

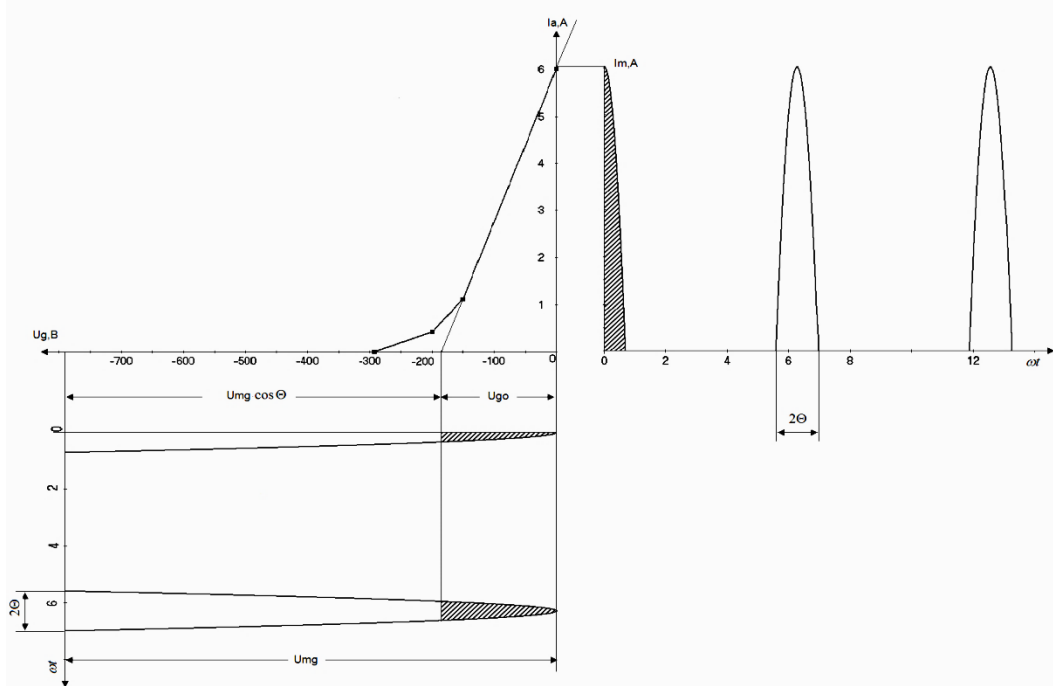


Рис. 2. Образование импульсов анодного тока при ускоряющем напряжении 40 кВ и угле отсечки 40°

Пользуясь известной методикой, применяемой для расчета триодных систем, для выбранного значения $\theta = 40^\circ$ находим коэффициенты Берга α_0 и α_3 :

$$\alpha_0 = \frac{\sin 40^\circ - 0,698 \cdot \cos 40^\circ}{3,14(1 - \cos 40^\circ)} = 0,147,$$

$$\alpha_3 = \frac{2(\sin(3 \cdot 40^\circ) \cos 40^\circ - 3 \cos(3 \cdot 40^\circ) \sin 40^\circ)}{3,14 \cdot (3^2 - 1)(1 - \cos 40^\circ)} = 0,185.$$

По этим коэффициентам определяем постоянную составляющую анодного тока одного луча

$$I_{a0} = \alpha_0 I_m \text{ и относительную величину третьей гармоники конвекционного тока } \frac{J_{a3}}{I_{a0}} = \frac{\alpha_3}{\alpha_0}.$$

$$I_{a0} = \alpha_0 I_m = 0.1476 \cdot 0.6 = 0.882 = 0.1476 \cdot 0.6 = 0.882 \text{ А.}$$

$$\frac{J_{a3}}{I_{a0}} = \frac{\alpha_3}{\alpha_0} = \frac{0.185}{0.147} = 1,26.$$

На рис. 3 представлены результаты численного расчета изменений относительных величин конвекционного тока J_{a3}, J_{a1} вдоль пространства взаимодействия. Видно, что относительная амплитуда третьей гармоники конвекционного тока за счет догруппирования возросла примерно в 1,2 раза (с 1,26 до 1,48).

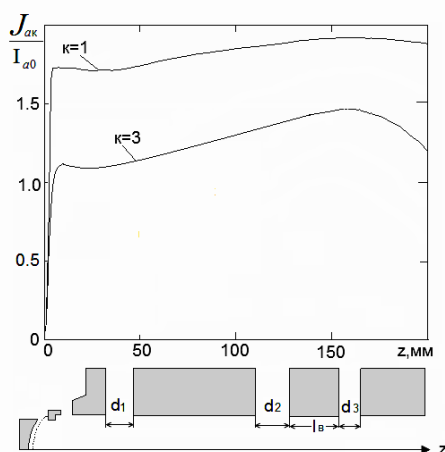


Рис. 3. Изменение относительных величин конвекционного тока J_{a3}, J_{a1} вдоль пространства взаимодействия

По полученным результатам можно оценить величину подводимой мощности на один луч:

$$P_{01} = I_m U_a \frac{\sin \Theta - \cos \Theta}{\pi(1 - \cos \Theta)} = 6 \cdot 40 \frac{\sin 0.698 - \cos 0.698}{\pi(1 - \cos 0.698)} = 26.5 \text{ кВт.}$$

При числе лучей, равном 6, подводимая мощность будет равна 159 кВт.

Полагая КПД прибора $\eta_e = P_{\text{вых}} / P_{01} = 0,5$, можно оценить выходную мощность $P_{\text{вых}} = 80$ кВт.

Следует отметить, что такая мощность недостижима в настоящее время для промышленных магнетронов, работающих на частоте 2450 МГц.

Предложенная методика и результаты расчета могут быть использованы в дальнейшем для выбора режима работы и уточненного расчета выходных параметров клистрода-умножителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Preist D.H. and Shrader M.B. The klystrode—an unusual transmitting tube with potential for uhf-tv // *proc. Ieee*. Vol.70. Nov. 1982. P.1318-1325
2. Патент RU 2073283 МПК H01J25/02, H01J25/04. Клистрод В.А. Царев, А.Ю. Мирошниченко. №94024403/07; заявл. 29.06.1994; опубл. 07.10.1997.
3. Корчагин А.И. Результаты математического моделирования двухзачорных резонаторов для мощных многолучевых клистронов, работающих в режиме умножения частоты / А.И. Корчагин, А.Ю. Мирошниченко, В.А. Царев // *Вестник СГТУ*. 2010. № 4. Вып. 3. С. 62-65.
4. Кармазин В.Ю. К вопросу моделирования и расчета электронно-оптических систем / В.Ю. Кармазин, В.А. Царев // *Математическое моделирование физических, экономических, технических, социальных систем и процессов: тр. Четвертой Междунар. науч.-техн. конф.* / УлГУ. Ульяновск, 2001. С. 47-48.
5. Агафонов Б.С. Расчет экспериментальных режимов УКВ и ДЦВ генераторных ламп / Б.С. Агафонов. М.: Энергия, 1966. 224 с.

Бороденкова Ирина Вячеславовна – аспирант кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Irina V. Borodenkova – Postgraduate
Department of Electronics,
Yuri Gagarin Saratov State Technical University

Царев Владислав Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vladislav A. Tsarev – Dr. Sc., Professor
Department of Electronics,
Yuri Gagarin Saratov State Technical University

Статья поступила в редакцию 17.03.15, принята к опубликованию 11.05.15

А.В. Бровко, Р.С. Пахарев

МЕТОД РЕКОНСТРУКЦИИ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПЕРЕМЕННОЙ ФОРМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Представлен метод восстановления внутренней структуры диэлектрического образца, помещённого в волноводную измерительную систему. Метод основан на использовании простых измерений в волноводной измерительной системе, применении искусственной нейронной сети для восстановления геометрических параметров исследуемого диэлектрического образца и сферической неоднородности, расположенной в данном образце. Приводятся результаты численных экспериментов, демонстрирующие возможности предложенного метода.

Искусственная нейронная сеть, алгоритм обучения нейронной сети, неразрушающий контроль материалов

A.V. Brovko, R.S. Pakharev

A RECONSTRUCTION METHOD FOR THE INNER STRUCTURE OF DIELECTRIC MATERIALS OF THE VARIABLE FORM USING THE ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

The paper presents a method for the restoration of the inner structure of the dielectric sample located in the waveguide measuring system. The method is based on the application of simple measurements to the waveguide measuring system, and the artificial neural network to the restoration of geometrical parameters of the investigated dielectric sample and spherical heterogeneity. The results of numerical experiments demonstrating the performance of the proposed method are presented.

Artificial neural network, training of neural network algorithm, non-destructive testing of materials

В настоящее время технология неразрушающего контроля материалов привлекает внимание исследователей в связи с большим потенциалом практического применения в различных областях, где необходим мониторинг внутренней структуры диэлектрических материалов [1].

Технология может быть применена в промышленности для нахождения дефектов в строительных материалах, в медицине для визуализации распределения мягких тканей человека. Однако особый интерес представляет применение технологии для мониторинга внутренней структуры материалов в процессе высокотемпературной обработки [2].

Для мониторинга внутренней структуры материалов на практике необходимо использовать излучатели электромагнитного поля, в качестве которых, как правило, используют антенные системы различной конфигурации и сложности. В настоящий момент такая методика хорошо проработана для открытых измерительных систем. Однако применение такой методики для закрытых систем вызывает значительные трудности, связанные со сложностью внедрения антенных систем в закрытую измерительную систему, например СВЧ печь [3].

При использовании технологии неразрушающего контроля для решения данной задачи в закрытой волноводной системе не нужно использовать антенные системы, так как необходимую для мониторинга информацию получают с помощью измерения коэффициентов отражения и прохождения электромагнитного поля (S-параметров), которые измеряются в портах, используемых для ввода и вывода электромагнитной энергии [4].

В качестве математической модели измерительной системы используется РБФ сеть – искусственная нейронная сеть с кубическими радиальными базисными функциями, играющими роль активационных функций. Входами РБФ сети являются коэффициенты отражения и прохождения электромагнитного поля, а выходами – параметры сферической неоднородности (трёхмерные координаты)

ты, радиус и диэлектрическая проницаемость) и диэлектрического образца (длина, ширина и высота), который содержит данную неоднородность.

Во время тренировки РБФ сети многократно решается прямая задача нахождения коэффициентов отражения и прохождения электромагнитного поля в измерительной системе, содержащей образец с известными геометрическими характеристиками. После обучения РБФ сеть способна восстанавливать выходные параметры с помощью весовых коэффициентов, которые вычисляются путём решения алгебраического уравнения в матричной форме с помощью метода наименьших квадратов.

1. Метод восстановления параметров неоднородности

Метод восстановления параметров одиночной сферической неоднородности, основанный на использовании искусственной нейронной сети, был предложен в [1]. Метод позволяет локализовать и определить размеры одиночной неоднородности в образце.

Однако если изменить местоположение образца в волноводе или использовать аналогичный образец, отличающийся от данного геометрическими размерами, то приведенный в [1] алгоритм становится неработоспособным.

Также стоит отметить, что прямоугольный двухпортовый волновод, выбранный в [1] в качестве измерительной системы, не пригоден для практического применения в условиях термической обработки материала.

Во-первых, в такой измерительной системе существует необходимость измерять S-параметры вдоль координатной оси OX для трех позиций диэлектрического образца, повернутых относительно друг друга на 90 градусов. Каждая из трёх позиций диэлектрического образца дает информацию о профиле проницаемости по одному из реальных координатных осей: OX, OY или OZ.

Во-вторых, данная измерительная система не позволяет восстанавливать большое количество параметров. Это обусловлено тем, что в двухпортовом волноводе S-параметры измеряются во входном и выходном портах, а этого недостаточно для того, чтобы в ходе измерений получить исчерпывающее количество S-параметров, необходимых для качественного восстановления.

Для успешного применения метода на практике нужна более совершенная измерительная система, например, турникетное соединение волноводов, изображённое на рис. 1.

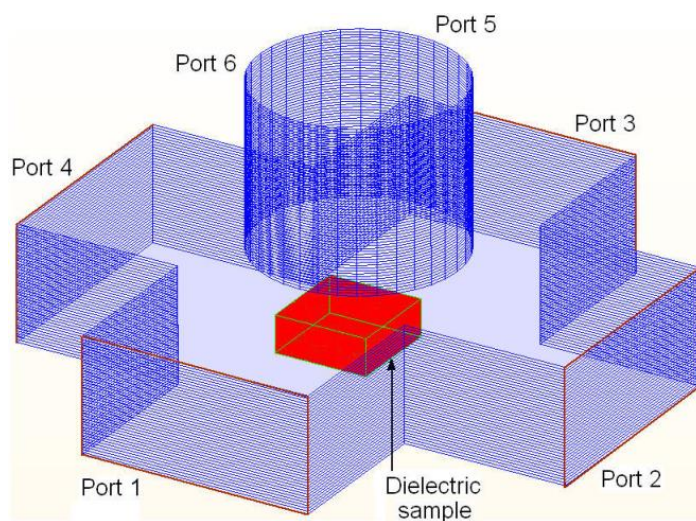


Рис. 1. Турникетное соединение волноводов

В настоящей работе представлены результаты численного исследования возможности восстановления геометрических параметров диэлектрического образца и сферической неоднородности, расположенной в данном образце.

Метод, используемый в настоящей работе, в основных чертах совпадает с тем, что приведен в [1] для восстановления параметров одиночного включения. Восстанавливаемыми параметрами являются: трёхмерные координаты, радиус и диэлектрическая проницаемость сферической неоднородности, а также длина, ширина и высота диэлектрического образца.

Для реконструкции параметров используется РБФ сеть (искусственная нейронная сеть с радиальными базисными функциями), структура которой представлена на рис. 2.

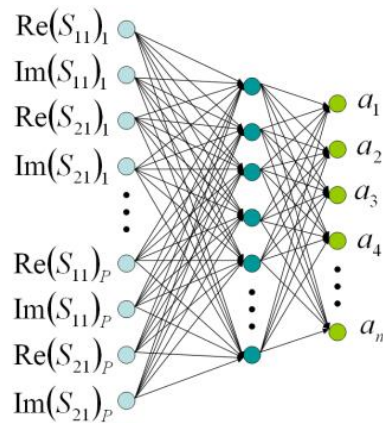


Рис. 2. Структура нейронной сети

Из рисунка видно, что РБФ сеть содержит три слоя: входной слой, слой нейронов с радиально-базисной функцией активации, выходной слой. При этом нелинейная функция активации применяется только в скрытом слое.

Входы РБФ сети – это S-параметры (действительные и мнимые части коэффициентов отражения и прохождения), измеряемые в волноводе. Выходы РБФ сети – это параметры, определяющие геометрические размеры сферической неоднородности и диэлектрического образца.

Измерительная система в виде турникетного соединения волноводов моделируется в специальной программе полного конечноразностного моделирования электромагнитных полей QuickWave-3D [5].

Тренировочные точки (векторы коэффициентов) генерируются как случайные комбинации параметров системы, равномерно распределенные в заданных интервалах. Соответствующие этим точкам наборы S-параметров получаются численным конечноразностным моделированием. Используя полученные численные наборы данных в качестве входных параметров можно обучать нейронную сеть, а затем, после обучения, восстанавливать параметры диэлектрического образца и сферической неоднородности, не участвовавших в обучении сети.

2. Численные результаты

В результате проведенного ранее моделирования измерительной системы была получена численная база данных, содержащая измеренные в портах волновода S-параметры и соответствующие им параметры диэлектрического образца и сферической неоднородности, расположенной в данном образце. Тренировочные точки генерировались как случайные значения выходных параметров РБФ сети, равномерно распределенные в заданных интервалах.

Целью данного исследования является программная проверка полученных в ходе моделирования данных на пригодность к практическому применению, определение влияния количества тренировочных точек на время работы алгоритма обучения и качество реконструкции выходных параметров РБФ сети.

В рамках данного исследования были определены оптимальные тренировочные наборы, которые позволяют восстанавливать выходные параметры с наименьшей средней относительной ошибкой вычисления.

Для проведения исследования были выбраны три различных тренировочных набора данных, отличающихся друг от друга количеством тренировочных точек, количеством входных и выходных параметров, а также типом измерительной системы, в которой производилось измерение входных параметров для реконструкции выходных параметров.

При исследовании каждого тренировочного набора данных вычислялось значение средней относительной ошибки реконструкции каждого выходного параметра и времени, затраченного для обучения нейронной сети на выбранном тренировочном множестве.

В ходе данного исследования количество входных параметров изменялось от 12 до 72, выходных – от 4 до 8, а количество тренировочных точек – от 500 до 3000. В качестве измерительных систем использовались двухпортовый волновод и турникетное соединение волноводов.

Набор данных 1.

Измерительная система: двухпортовый волновод.

Количество входных параметров: 12.

Количество выходных параметров: 4.

Количество тренировочных точек: 1500.

Средние относительные ошибки восстановления каждого выходного параметра и время обучения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Средние относительные ошибки

N	X	Y	Z	R	avg	t
500	15,2	7,4	8	22,2	13,2	5
750	0,8	1,6	0,9	1,1	1,1	12
1000	1,1	1,5	0,5	6,1	2,3	22
1250	0,6	0,6	0,7	8,8	2,675	38
1500	0,7	1,1	0,7	7,1	2,4	56

В данной таблице значения средних относительных ошибок представлены в процентах, а время обучения – в секундах.

Зависимость средней относительной ошибки восстановления (avg) от количества тренировочных точек (N) изображена на графике (рис. 2).

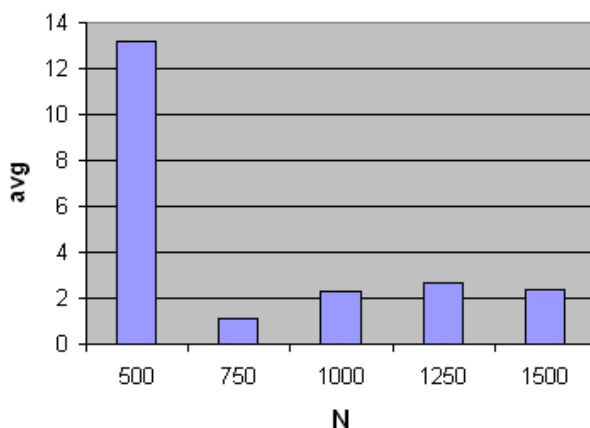


Рис. 2. График зависимости avg от N

На рисунке видно, что минимальное значение средней относительной ошибки (avg) достигается при 750 тренировочных точек (N).

Зависимость времени обучения (t) от количества тренировочных точек (N) изображена на графике (рис. 3).

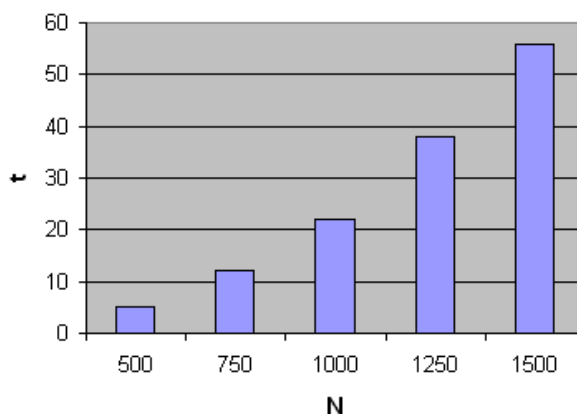


Рис. 3. График зависимости t от N

На рисунке видно, что время обучения (t) находится в прямой нелинейной зависимости от количества тренировочных точек (N).

Набор данных 2.

Измерительная система: двухпортовый волновод.

Количество входных параметров: 12.

Количество выходных параметров: 5.

Количество тренировочных точек: 2100.

Средние относительные ошибки восстановления каждого выходного параметра и время обучения представлены в табл. 2.

Таблица 2

Средние относительные ошибки

N	X	Y	Z	R	E	avg	t
500	13,2	16,5	19,3	7,6	17,4	18,5	5
750	7,8	7,2	11,2	4,1	19,3	12,4	12
1000	1,2	1	1,1	0,9	2,5	1,675	22
1250	1,2	0,9	1,2	2,1	3,7	2,275	38
1500	1,4	1,1	1,4	1,7	3,4	2,25	57
1750	2,6	1,6	2	2,5	4	3,175	81
2000	1,6	1,4	2	1,5	3,1	2,4	107
2100	2	1,6	1,9	1	3,6	2,525	122

В данной таблице значения средних относительных ошибок представлены в процентах, а время обучения – в секундах.

Зависимость средней относительной ошибки восстановления (avg) от количества тренировочных точек (N) изображена на графике (рис. 4).

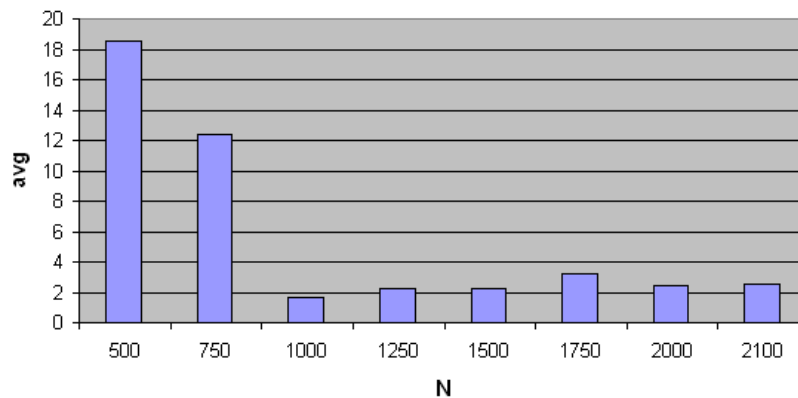


Рис. 4. График зависимости avg от N

На рисунке видно, что минимальное значение средней относительной ошибки (avg) достигается при 1000 тренировочных точек (N).

Зависимость времени обучения (t) от количества тренировочных точек (N) изображена на графике (рис. 5).

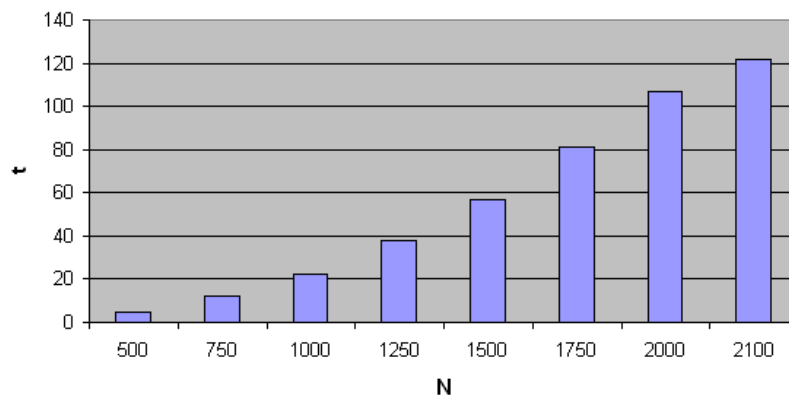


Рис. 5. График зависимости t от N

На рисунке видно, что время обучения (t) находится в прямой нелинейной зависимости от количества тренировочных точек (N).

Набор данных 3.

Измерительная система: турникетное соединение волноводов.

Количество входных параметров: 72.

Количество выходных параметров: 8.

Количество тренировочных точек: 3000.

Средние относительные ошибки восстановления каждого выходного параметра и время обучения представлены в табл. 3.

Таблица 3

Средние относительные ошибки восстановления параметров

N	X	Y	Z	R	E	Wl	Ww	Wh	avg	t
500	10,3	9,5	16,4	26,9	26,9	2,8	3,2	8,1	13,0125	13
750	7,5	8,6	16,2	9,5	24,6	1,4	1,6	3,3	9,0875	23
1000	6,8	7,4	15,8	8,4	24,8	1,3	1,7	3,4	8,7	44
1250	7,2	6,9	20,9	10,5	21,4	1,4	1,8	3,9	9,25	69
1500	6	6,4	19,5	8,4	20,1	1,1	1,5	3	8,25	113
1750	5,9	8,6	32,2	10,1	19,3	1,2	1,6	4,4	10,4125	151
2000	5,3	5,7	14,2	7,7	20,8	1,4	1,9	2,9	7,4875	202
2250	6,2	6,8	11,3	7,1	22,3	1,1	1,2	2,3	7,2875	263
2500	5,6	7,7	12,1	7,2	23,2	1,5	1,4	2,5	7,65	347
2750	5,5	8,3	27,8	7,9	26,5	9,4	9,5	8,2	12,8875	422
3000	6,7	5,7	13,6	8,5	28,1	5,2	5,3	4,7	9,725	510

В данной таблице значения средних относительных ошибок представлены в процентах, а время обучения – в секундах.

Зависимость средней относительной ошибки восстановления (avg) от количества тренировочных точек (N) изображена на графике (рис. 6).

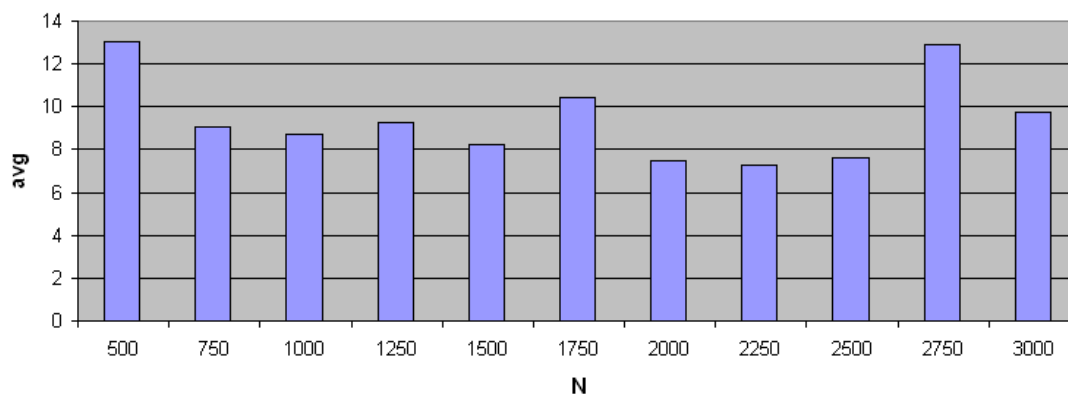


Рис. 6. График зависимости avg от N

На рисунке видно, что минимальное значение средней относительной ошибки (avg) достигается при 2250 тренировочных точек (N).

Зависимость времени обучения (t) от количества тренировочных точек (N) изображена на графике (рис. 7).

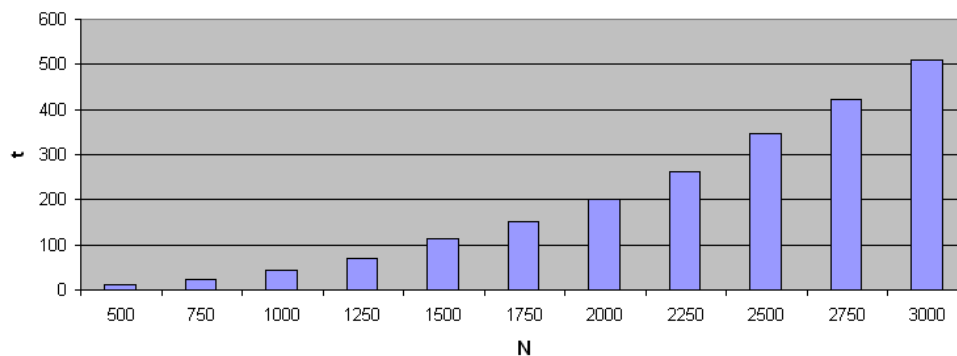


Рис. 7. График зависимости t от N

На рисунке видно, что время обучения (t) находится в прямой нелинейной зависимости от количества тренировочных точек (N).

Двухпортовый волновод позволяет с высокой точностью восстанавливать параметры сферической неоднородности, однако на практике его применение сильно ограничено из-за необходимо-

сти вращать образец для измерения S-параметров относительно направления распространения электромагнитной волны.

Турникетное соединение волноводов позволяет измерять намного больше S-параметров и не требует вращения образца во время измерений, что дает потенциальную возможность успешного применения методики на практике, однако стоит заметить, что использование многопортовой системы требует разработки дополнительной коммутирующей СВЧ цепи, позволяющей измерять матрицу рассеяния системы с использованием стандартных анализаторов цепей, имеющих, как правило, от двух до четырех портов.

Заключение

Численные результаты демонстрируют возможность достаточно точного восстановления геометрических параметров диэлектрического образца и сферической неоднородности, расположенной в данном образце.

Метод реконструкции внутренней структуры диэлектрического материала основан на применении искусственной радиальной нейронной сети, которая реализует математическую модель измерительной системы. В качестве измерительной системы было выбрано турникетное соединение волноводов.

Исходными данными для реконструкции параметров являются коэффициенты отражения и прохождения в портах волноводной системы. Исходные данные для обучения нейронной сети были получены с помощью полного электромагнитного моделирования системы в программной среде QuickWave-3D [5].

В результате проведенного исследования было установлено, что разработанное программное обеспечение позволяет восстанавливать параметры сферической неоднородности и диэлектрического образца, и может быть использовано на практике, например, для мониторинга внутренней структуры материала во время его термической обработки в СВЧ печи.

Полученные результаты могут быть использованы практически во всех областях, где необходим мониторинг внутренней структуры диэлектрических материалов, например медицинская диагностика, промышленность, технология термической обработки диэлектриков, технология обработки пищевых продуктов.

Особый интерес представляет использование предлагаемой методики и программного обеспечения в задачах мониторинга материалов в процессе высокотемпературной обработки.

При использовании метода в промышленных установках может потребоваться модификация математической модели, учитывающая конструктивные особенности оборудования. В этом случае будет необходимо сформировать наборы данных по результатам численного моделирования промышленной установки, возможно, с использованием высокопроизводительных вычислений [6]. Однако основная идеология метода, тип и алгоритм обучения нейронной сети могут быть оставлены без изменений. При необходимости возможна модификация алгоритма обучения нейронной сети с использованием метода конечных разностей [7, 8], а также алгоритмов, учитывающих нелинейность материала диэлектрического образца [9].

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ и Германской службы академических обменов DAAD.

ЛИТЕРАТУРА

1. Waveguide microwave imaging: spherical inclusion in a dielectric sample / A.V. Brovko, E.K. Murphy, M. Rother, H.P. Schuchmann, V.V. Yakovlev // IEEE Microwave and Wireless Comp. Lett. 2008. Vol. 18. № 9. P. 647-649.
2. Mydur R. A neural-network approach to the electromagnetic imaging of elliptic conducting cylinders / R. Mydur, K. A. Michalski // Microwave and Opt. Techn. Lett. 2001. vol. 28, №. 5. P. 303-306.
3. Rekanos I.T. On-line inverse scattering of conducting cylinders using radial basis-function neural networks / I.T. Rekanos // Microwave and Opt. Techn. Lett. 2001. Vol. 28. № 6. P. 378-380.
4. Rekanos I.T. Neural-network-based inverse-scattering technique for online microwave medical imaging / I.T. Rekanos // IEEE Trans. on Magn. 2002. Vol. 38. №. 2. P. 1061-1064.
5. QuickWave-3DTM, QWED Sp. z o. o., ul. Piękna 64a m 11, 00-672 Warsaw, Poland, <http://www.qwed.com.pl/>.
6. Долинина О.Н. Метод повышения эффективности обработки видеoinформации с использованием GRID-вычислений / О.Н. Долинина, А.В. Ермаков // Вестник СГТУ. 2010. №4 (50). Вып. 2. С. 131-133.

7. Клеев А.И. Численные методы расчета диэлектрических волноводов (волоконных световодов). Универсальные методики / А.И. Клеев, А.Б. Маненков, А.Г. Рожнев // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38. № 11. С. 1938.

8. Коломейцев В.А. Моделирование нерегулярных волноводных структур сложной конфигурации с неоднородным поглощающим заполнением / В.А. Коломейцев, В.В. Комаров, С.В. Хомяков // Радиотехника и электроника. 2000. Т. 45. № 12. С. 1420.

9. Petrov E.Yu. Exact axisymmetric solutions of the maxwell equations in a nonlinear nondispersive medium / E.Yu. Petrov, A.V. Kudrin // Physical Review Letters. 2010. Т. 104. № 19. p. 190404.

Бровко Александр Валерьевич –
кандидат физико-математических наук, доцент
кафедры «Прикладные информационные
технологии» Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksandr V. Brovko –
Ph.D., Associate Professor
Department of Applied Information Technologies,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Пахарев Руслан Сергеевич –
магистрант международного факультета
прикладных информационных технологий
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Ruslan S. Pakharev –
Master Student
International Faculty of Applied
Information Technologies,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.02.15, принята к опубликованию 11.05.15

УДК 519.676

В.Г. Василевский

ВЕРОЯТНОСТНОЕ ЛОГИЧЕСКОЕ ПОНЯТИЕ

Описано исследование подходов к моделированию процесса рассуждения и поиск фундаментальных средств для его реализации. Представлен процесс рассуждения, основополагающей частью которого является интерпретация содержания логических понятий. Изучается моделирование содержания понятий и их интерпретация из плотности вероятности. Предложено воссоздание модели содержания понятия путём обобщения сведений по средствам восстановления плотности вероятности. Описана интерпретация плотности вероятности в оценку отношения объекта и понятия.

Имитация процесса рассуждения, интерпретация понятия, моделирование содержания, плотность вероятности

V.G. Vasilevskiy

A PROBABILISTIC LOGICAL CONCEPT

A research into approaches to the simulation of reasoning, and a search of the fundamental techniques for its implementation are described. The process of reasoning as a fundamental part to interpretation of the content of logical concepts is presented. Simulation of the content of concepts and their interpretation in terms of the probability density is under study. A reconstruction of the model to the content of a concept by synthesizing the data using the restoration of density probability technique is offered. Interpretation of the probability density in the assessment of the object and concept relation is described.

Imitation of process of a reasoning, interpretation of concept, modeling of the contents, probability density

Введение

Существует предположение, что любые рассуждения должны строиться в соответствии некоторыми правилами и законами, что в результате позволит всегда получать правильные выводы, пригодные для практического применения. Некоторые специалисты допускают возможность существования подхода к математическому моделированию, позволяющего реализацию искусственных средств имитации рассуждений. Но данная точка зрения на сегодняшний день не подтверждается и не опровергается имеющимися результатами. Именно это заставляет продолжать научные поиски в направлении имитационного моделирования процесса рассуждения, которое бы позволило решить эти и многие сопутствующие проблемы. Исследование структуры процесса рассуждений и поиск фундаментальных средств для его осуществления связаны с потребностью в решении ряда актуальных задач, таких как: распознавание образов, моделирование искусственных субъектов, проектирование систем поддержки принятия решений и многих других.

Предположительно, основой моделирования рассуждения может стать математическая реализация интерпретации (или истолкования) содержания понятий. В соответствии с ней может формироваться модель содержания, которая представляется под некоторым именем понятия. Саму интерпретацию может осуществлять математический интерпретатор, функции которого в естественной среде выполняет субъект. В таком случае интерпретация или толкование представляются фундаментальным средством для осуществления моделирования рассуждения, от неё зависит весь вывод, все правила и законы.

В контексте поставленной задачи стоит разделять явление естественного субъективного восприятия и рассуждения и попытку математической имитации этого процесса. То есть целью исследования нового подхода к моделированию является построение решения для существующих концепций и схем рассуждений. При этом отсутствует цель обогащения абстрактных общепризнанных знаний о методах познания и размышления. Такие обстоятельства вводят необходимость использовать строгий конструктивный подход и минимум абстракции, чтобы все перечисленные действия были реализуемы, в том числе, на вычислительной технике. Это вынуждает прибегнуть к конструктивным концепциям, что выражается в применении таких базовых терминов и средств, как конструктивный объект [1], набор, данные и алгоритм [1, 2], на основе которых моделируется решение поставленной задачи.

Одним из направлений математики, существенно преуспевшим в области реализации средств для обработки массы исходных сведений и их статистического анализа, является теория вероятностей. Некоторые элементы этой теории могли бы лечь в основу интерпретации. Однако для утверждения в роли интерпретатора необходимо провести сопоставление возможностей элементов теории вероятностей с потребностями в интерпретации и толковании понятий.

Очевидно, что интерпретатор, основанный на применении элементов теории вероятности, мог бы адекватно применяться только в рамках применимости этой теории, то есть исходные данные должны соответствовать характеристикам вероятностного процесса. Чаще всего проблема может возникнуть с использованием в хаотических системах, которые считаются в чем-то похожими на вероятностные, но в целом сильно отличаются от них [3]. Некоторые хаотические процессы можно распознать на этапе предварительной обработки исходных данных и применять соответствующие методы [4].

Классическая и нечёткая интерпретации содержания логических понятий

Интерпретация логического понятия, осуществляемая экспертом при оценке отношения реальных объектов к понятиям, представляет собой весьма неоднозначное действие. Эксперт сам для себя решает, как лучше поступить. При этом встречаются случаи, когда не ясными остаются и содержание понятия, и методы интерпретации, и суть оценки отношения объекта к понятию. Прежде чем представить подходы к моделированию интерпретации, претендующие на фундаментальность и дальнейшее развитие, необходимо описать общую схему существующей интерпретации содержания понятия и обстоятельства её проявления.

Обозначим понятие как пару $\langle k, C \rangle$, где k – наименование понятия, C – содержание понятия. Содержание понятия представляет собой описание, которое можно интерпретировать в оценку отношения объекта и понятия $x \sqsubset k$. Содержание понятия задаётся дефиницией, в которой обязательно должны быть учтены особенности интерпретации содержания, чтобы оно адекватно использовалось и могло бы дать результаты, соответствующие ожидаемым.

Объекты x относятся к различным понятиям k . Отношение объекта и понятия $x \sqsubset k$ играет важную роль в практическом применении рассуждений. Субъект соотносит новый объект с понятием

ми, содержание которых ему известно, и только потом делает выводы и принимает решения, уже на основе отношений, определённых на самих понятиях.

Отношение $x \sqsubset k$ оценивается некоторым набором величин, которые называются оценкой отношения $x \sqsubset k$. Таким образом, оценка отношения объекта и понятия имеет важную прикладную ценность. Также с её помощью можно узнать объем понятия.

Объем понятия – всевозможные объекты, оценка отношения которых к понятию больше некоторого порогового значения p . Объем может быть выражен в виде ряда пар <объект x , оценка $x \sqsubset k$ >. При $p = 0$ имеем полный набор оценок объёма.

Объем понятия зависит от оценки $x \sqsubset k$, которая зависит от интерпретации содержания. Таким образом, объем понятия зависит от его содержания. Согласно закону обратного отношения объёма и содержания понятия, увеличение или усложнение содержания понятия уменьшает его объем, а увеличение объёма понятия уменьшает или упрощает его содержание [5, с. 397]. Предположительно, при использовании исследуемых подходов к моделированию содержания закон должен выполняться.

На рис. 1 изображено представление понятия в виде двух пересекающихся блоков: содержания и объёма. Содержание может быть интерпретировано в оценку отношения объекта и понятия, на основе которого может быть установлен его объём.

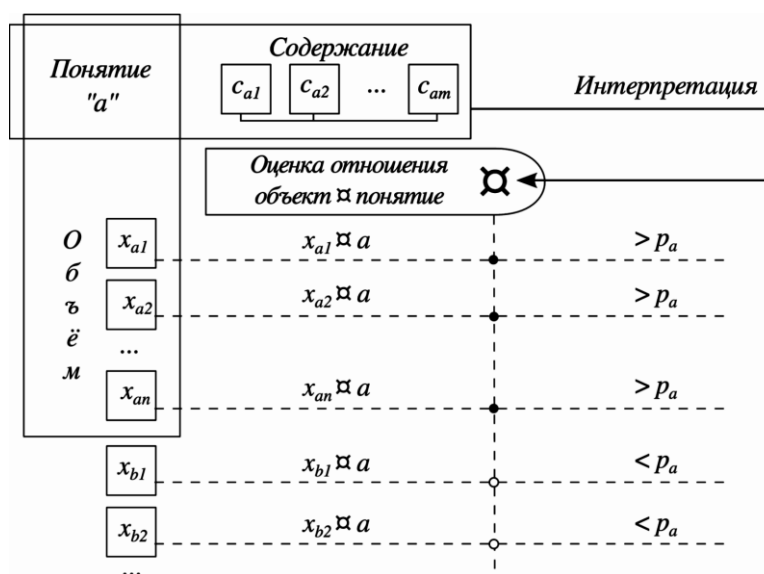


Рис. 1. Представление понятия в виде двух пересекающихся блоков: объёма и содержания, интерпретация последнего в оценку отношения объекта и понятия, установление объёма по полученной оценке

В классической и нечёткой интерпретациях отношение объекта рассуждения и понятия задаётся самим субъектом рассуждения, оценивается критерием принадлежности и обозначается знаком « \in » ($x \in k$). Эксперт руководствуется некоторым описанием и опытом, которые интерпретирует в оценку отношения. Нечёткая обозначает, что отношение принадлежности оценивается диапазоном значений от 0 до 1; классическая – только двумя значениями: 0, 1. Для решения задач повторяющихся на одном и том же универсуме могут использоваться заранее собранные экспертные сведения оценки такого отношения.

Оценка в диапазоне от 0 до 1 связана с неопределённостью содержания используемых понятий. Так, например, температура измеряется по строго определённой шкале, но несмотря на это, понятия тёплый, горячий, холодный оценить с достаточной точностью не удаётся. То есть неопределённость связана не столько с самими объектами, сколько с отсутствием чёткого представления содержания, и как такового способа его интерпретации. Все опирается на субъективное мнение эксперта, на его способность понимать и интерпретировать содержание.

Определение содержания понятия называется дефиницией.

«Определение, дефиниция (от лат. definitio), указание или объяснение значения (смысла) термина и (или) объёма (содержания) выражаемого данным термином понятия; этот термин (понятие) называется определяемым (лат. definiendum, сокращенно Dfd), а совокупность действий (слов), осуществляющих его Определение (объяснение значения), – определяющим (лат. definiens, сокращение Dfn). Dfd Определение (объяснение значения) всегда является словом (термином, именем понятия). Dfn же может быть как словом, так и некоторым конкретным, совершенно реальным предметом – и в

этом последнем случае Определение (объяснение значения) состоит в указании на этот предмет в самом буквальном смысле, например жестом или каким-либо другим способом «предъявления» этого предмета. Такие Определения (объяснение значения), по самой сути несущие информацию лишь об объёме (или даже части объёма) определяемого понятия, называются остенсивными. Они играют важную роль в процессе познания и в повседневной практике: именно с их помощью происходит то «первоначальное накопление» понятий, без которого было бы вообще невозможно познание», – говорится о дефиниции в Большой Советской энциклопедии [6].

Дефиниция зависит от способа интерпретации, так как полученное в результате дефиниции содержание понятия, в первую очередь, должно быть правильно истолковано. Дефиниция содержания остенсивного понятия может быть представлена в виде соответствия по некоторым указателям на объекты. Таким образом, содержание остенсивного понятия задаётся через его объём, но сам объём этого понятия также оценивается на основании интерпретации содержания, как и объём любого другого понятия.

Обобщение можно назвать частным случаем дефиниции, так как с его помощью объясняется содержание. Понятие может быть определено как обобщение содержания некоторых других понятий. С другой стороны, понятие может быть определено как обобщение сведений о нескольких объектах, но не так, как в остенсивной дефиниции, а путём отображения сводных характеристик этих объектов в содержание.

Моделирование вероятностного содержания

Известен метод оценки высказывания, основанный на вероятности его истинности. Он представлен в вероятностной логике [7]. Такой подход позволяет нам рассуждать по средствам построения из простых высказываний более сложных и делать выводы. Однако структура простого высказывания остаётся не ясной. При этом в нечёткой логике структура высказывания очень точно разбирается и моделируется на основании используемых в нём понятий, модель которых представляется функцией принадлежности, и операций над ними, определённых на значениях этой принадлежности. В связи с этим возникает необходимость такой же последовательной реализации в случае использования средства теории вероятностей, иначе её применение может оказаться недостаточно конструктивным и, следовательно, недостаточно эффективным.

Вероятность имеет несколько различных объяснений. С учётом необходимости процедуры обобщения исходных данных для более точного имитирования индуктивной составляющей посредством элементов теории вероятностей наибольший интерес представляет использование частотной вероятности, предложенной Р. Мизесом [8]. При этом допустимо, что в рамках решения некоторой конкретной задачи эксперт может применять то объяснение вероятности, которое будет соответствовать стоящим перед ним целям.

Использование вероятности как модели содержания понятия позволяет дать оценку отношения подмножества объектов и понятия. Это могло бы решить некоторые задачи логики, но в общем случае все же не соответствует привычному способу применения её правил и законов. Это связано с тем, что вероятность определена на подмножествах, и, несмотря на возможность получить значение от подмножества, состоящего всего из одного элемента, это все же не то же самое, что операция, определённая на объектах, принимающая на входе отдельный элемент. А именно такое отношение между объектом и понятием является фундаментальным, на основе него строятся последующие рассуждения. По этой причине для дальнейшего моделирования рассмотрим не саму вероятность, а плотность вероятности как модель содержания понятия, которую будем интерпретировать в оценку отношения объекта и понятия.

Перейти от накопленных сведений к плотности вероятности можно с помощью восстановления функции плотности вероятности [9]. Таким образом, происходит попытка воссоздать модель содержание понятия по его объёму, то есть попытка реализовать обратную процедуру: не оценить объём по содержанию, а по объёму установить содержание (на сколько это возможно). Стоит учитывать, что в результате получается модель вероятностного содержания – понятие, которое может не совсем соответствовать ожидаемому, так как на неё накладываются особенности моделирования вероятностного содержания и его интерпретации.

В этом случае модель содержания понятия представляет собой плотность вероятности, обобщение сведений – восстановление функции плотности вероятности, а интерпретация вероятностного содержания – операции над значениями этой функции, в том числе оценку отношения объекта и понятия.

В логике также возможны так называемые первичные термины, которые определяются, соответственно, первичными утверждениями или аксиомами [10]. Подобно этому у экспертов, использующих представленный подход к моделированию, есть возможность задать модель вероятностного содержания

на своё усмотрение, как априорную плотность вероятности. Именно поэтому трактовку термина «вероятность» эксперт может задавать на своё усмотрение, а при возможности достижения большей результативности – даже совмещать различные вероятностные концепции.

Моделирование содержания путём обобщения и его интерпретация

Предположим, что исходные данные представляют собой:

- ряд пар $\langle x, y_s \rangle$ представляющих объекты (x – неповторяющиеся имена, $y_s = \langle y_1, y_2, \dots, y_n \rangle$ – набор величин, соответствующих некоторым измерениям объектов $\langle Y_1, Y_2, \dots, Y_n \rangle$);
- набор неповторяющихся имён понятий k ;
- ряд неповторяющихся пар $\langle x, k \rangle$, относящих объект x к понятию k .

На рис. 2 изображена схема исходных данных с комментариями, построенная по принципу реляционных таблиц. Таблица объектов $\langle x, y_s \rangle$, таблица имен понятий k , таблица отношений объектов и понятий $\langle x, k \rangle$, связанная с таблицей объектов и таблицей понятий.

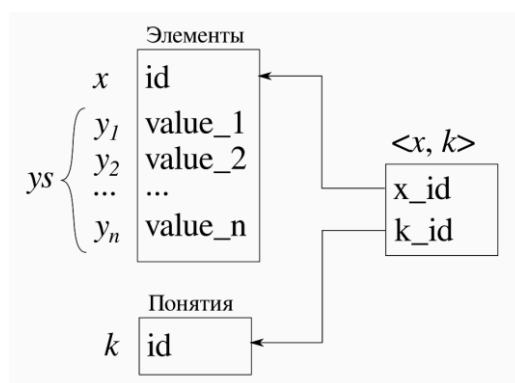


Рис. 2. Схема исходных данных

Один объект x может быть отнесён к нескольким понятиям k . Из исходных данных по имени понятия k можно получить набор объектов x , отнесённых к нему, а по имени объекта x – набор понятий k . Можно строить более сложные запросы, которые будут возвращать объекты x , отнесённые сразу к нескольким понятиям k , или же отнесённые к одному, но не к другому.

Каждому x соответствует один набор зафиксированных за ним значений y_s . При этом возможен одинаковый набор y_s для нескольких разных x . Представление x через зафиксированные о нём значения вызывает неоднозначность, так как в общем случае по имеющемуся набору значений y_s нельзя с полной уверенностью сказать, о каком именно объекте x идёт речь.

Модель содержания понятия k воссоздаётся по средствам обобщения отнесённых к нему исходных объектов x и представляется в виде плотности вероятности, определённой на значениях y_s . Процесс обобщения реализуется восстановлением функции плотности вероятности. Такая модель интерпретируется в оценку отношения нового объекта x_0 и понятия k следующим образом: по y_{s_0} нового объекта x_0 получаем значение плотности $p(y_{s_0})$, которое было определено обобщением предварительно собранных сведений.

Рассмотрим пример обобщения исходных данных в модель вероятностного содержания и его интерпретацию в оценку. Предположим, что $y_s = y(x)$, то есть зафиксированы сведения всего об одном измерении Y . Рис. 3 иллюстрирует данный пример, на нём изображены:

- график $y(x)$, объекты x расположены в порядке возрастания значений y ,
- график плотности вероятности $p(y)$,
- график плотности вероятности $p_y(x)$, как отображение плотности $p(y)$ на объекты x .

Отношение, которое оценивается критерием плотности вероятности, обозначим символом « \triangleleft »:
 $x \triangleleft k$, $y_s \triangleleft k$. Оценка отношения $x \triangleleft k$ представляет собой отображение результата оценки $y_s \triangleleft k$ на объекты x .

Сумма интегралов плотностей вероятности отношения y_s к понятию k_i на всех измерениях по всей области определения, где учтены все понятия k , равна 1. Так задаётся область рассуждений U , которая представляет собой все участвующие в ней понятия. Вероятность отношения любого исходного объекта к области рассуждения U равна единице.

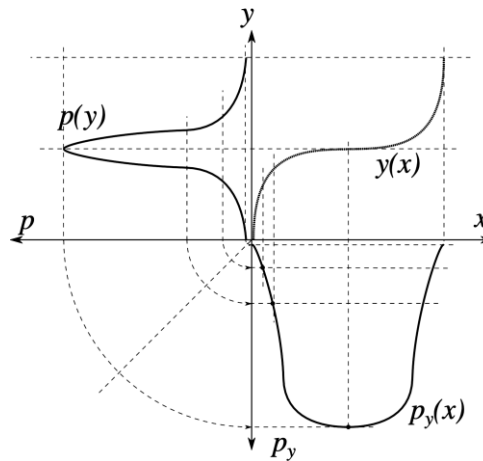


Рис. 3. График значений элементов $y(x)$ в порядке возрастания y , график плотности $p(y)$, график плотности $p_y(x)$ как отображение плотности $p(y)$ на x

Заключение

Подход к интерпретации, реализованный посредством применения элементов теории вероятностей позволяет моделировать вероятностное содержание понятия: либо обобщённое из исходных сведений, либо заданное осведомлённым субъектом. Предполагается, что есть ряд достоверных сведений, в рамках которых происходит рассуждение, однако не отрицается возможность существования объектов, которые могут несколько менять толкование данного понятия. Это является особенностью применения элементов теории вероятностей для интерпретации.

Применение вероятностного содержания понятия и его интерпретация наиболее уместны в задачах, где уже собраны достаточно полные исходные сведения о рассматриваемых логических понятиях, которые можно было бы представить в вероятностном виде. К сожалению, не всегда возможно воспользоваться собранными сведениями в описанном контексте, так как некоторые объекты могут представлять собой такую конструкцию, которую невозможно описать в виде набора значений соответствующих измерений. Однако можно с уверенностью заявить, что там, где это возможно (где оправданно применение плотности вероятности и имитация рассуждений может дать ожидаемый результат), применение вероятностного содержания понятия будет уместным и весьма эффективным.

Плотность вероятности позволяет производить разграничение между понятиями. Однако при пересечении заданных моделей содержания понятий, объёмы которых не должны пересекаться, неизбежно будут возникать ошибки. В некоторых случаях это может быть связано с недостаточно хорошим выбором параметров модели, например набора измерений исходных объектов. Это ещё один вид неоднозначности и неопределённости наряду с неясным содержанием понятий. То есть не только понятия могут быть представлены неточно, но и объекты могут быть описаны тем набором величин, который оказался собран, и соответственно рассматривается на столько, насколько это позволяют собранные о них сведения. Это позволяет обрабатывать данные и предпринимать действия по минимизации ошибок даже в тех случаях, когда другие методы оказываются просто неприменимыми. Стоит учитывать, что такая гибкость провоцирует случаи явных противоречий, когда заведомо известно, что объект относится к одному понятию, а оценка отношения – к другому понятию, и при автоматизированном распознавании произойдёт ошибка.

Примечательно, что в рамках описанного подхода к моделированию содержания понятия появляется возможность реализовать такую операцию, как обобщение, которая является одной из разновидностей дефиниции. То есть при наличии собранных исходных сведений способ вероятностной интерпретации содержания позволяет определить понятие более конструктивно, не прибегая к помощи экспертов изучаемой области. Несмотря на то, что исходный набор все-таки задаётся экспертами многократным отнесением отдельных объектов к понятиям, можно предположить, что восстановление плотности вероятности все же объективнее, чем описание, основанное на безоговорочном доверии экспертному мнению. Применение плотности вероятности в процессе рассуждений стоит воспринимать как инструмент, который позволяет экспертам увеличить эффективность и точность, опираясь на вероятностную схему рассуждений. То есть описанный подход может облегчить работу людей, формализующих и обобщающих данные в логические понятия для дальнейшего использования в рассуждениях. Также сам процесс рассуждения становится более

ясным, что предполагает возможность более объективного решения конфликтных или противоречивых ситуаций.

В случаях, когда в качестве исходных данных выступают результаты работы математического вероятностного процесса, использование модели вероятностного содержания может быть ещё более объективно. Однако даже такое использование исходного набора для дефиниции понятия по средствам восстановления плотности вероятности порождает вопрос полноты исходных данных. Принять решение о её применении в том или ином виде может только эксперт. Это связано с тем, что ожидаемый итог известен только ему, и только он может предполагать, что конструкция достаточно хороша для достижения поставленной им цели.

Ясность и конструктивность процесса, которая достигается применением элементов теории вероятностей к имитации рассуждений, не только означает уместность и приемлемость предложенного подхода к моделированию рассуждений, но и оказывает положительное влияние на решение проблемы моделирования процесса рассуждений в целом, причем исследование, описанное в статье, принципиально не касается абстрактных общеполитических суждений о логических методах интеллектуальной познавательной деятельности. Не привносится утверждений или замечаний о том, как субъект производит свои рассуждения, вместо этого за основу берутся принципы, уже описанные в логике, и известные примеры их математизации, а именно классическая и нечёткая интерпретации логических понятий.

Моделирование имитации процесса рассуждения остаётся актуальной задачей, так как ещё многое до конца не изучено. Так, например, актуальна тема – исследование более сложных, чем основанное на элементах теории вероятностей, чьё применение ограничивается вероятностными процессами, направлений моделирования. Одним из них является полностью конструктивный подход к имитации рассуждения, который предполагает не только собственную реализуемость, но и реализуемость процесса рассуждения для достижения правильных выводов, пригодных к применению, то есть моделирование явления, в некотором смысле схожего с языком, так как предполагается, что конструкция должна быть способна описать сама себя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марков А.А. Избранные труды. Т. II. Теория алгоритмов и конструктивная математика, математическая логика, информатика и смежные вопросы / А.А. Марков. М.: Изд-во МЦНМО, 2003. 626 с.
2. Марков А.А., Нагорный Н.М. Теория алгоритмов / А.А. Марков, Н.М. Нагорный. 2-е изд. М.: ФАЗИС, 1996.
3. Паркер Т.С., Чжуа Л.О. Введение в теорию хаотических систем для инженеров / Т.С. Паркер, Л.О. Чжуа // ТИИЭР, 1987. Т. 75. № 8. С. 6-40.
4. Автоматизация научных исследований систем с хаотическим поведением / Василевский В.Г., Лисицин А.Л., Гордиенко В.В., Ковтун Д.Р. // Информационные системы Теория и практика. Курский государственный университет. Курск, 2013. С. 13-18
5. Кондаков Н.И. Логический словарь-справочник / Н.И. Кондаков. 2-е изд. М.: Наука, 1975.
6. Большая Советская энциклопедия. 3-е изд. М., 1974.
7. Философская Энциклопедия: в 5 т. / под ред. Ф.В. Константинова. М.: Сов. Энциклопедия, 1960-1970.
8. von Mises R. Mathematical Theory of Probability and Statistics / Richard von Mises. New York: Academic Press, 1964.
9. Schuster E.F. Estimation of a probability density function and its derivatives / E.F. Schuster // Ann. Math. Statist. 1969. V. 40. № 4. P.
10. Тарский А. Введение в логику и методологию дедуктивных наук: пер. с англ. / А. Тарский. М., 1948.

Василевский Валентин Германович – аспирант кафедры программного обеспечения и администрирования информационных систем Курского государственного университета

Valentin G. Vasilevski – Postgraduate Department of Software and of Information Systems Administration, Kursk State University

Статья поступила в редакцию 20.01.15, принята к опубликованию 11.05.15

В.П. Костюк, А.А. Хействер

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ МАРШРУТИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ПассаЖИРОВ ОБЩЕСТВЕННЫМ ТРАНСПОРТОМ

Предлагается комплекс взаимосвязанных нейросетевых и генетических моделей, методов и алгоритмов для решения задач выбора рациональных маршрутов движения общественным транспортом в городской транспортной системе.

Городская транспортная система, нейросетевая модель, неформальные факторы, выбор маршрутов движения

V.P. Kostyuk, A.A. Kheystver

MODELS AND METHODS FOR RESEARCH AND DEVELOPMENT OF ROUTING PUBLIC PASSENGER TRANSPORT

The paper deals with a set of interconnected neural networks and genetic models, including the methods and algorithms for solving the problems related with selection of the rational public transport routes in the city transport system.

City transport system, neural network model, informal factors, the choice of routes

Введение

Пассажирский транспорт является важнейшей отраслью жизнеобеспечения каждого города. Повышение эффективности управления движением транспорта относится к приоритетным задачам государственной деятельности Правительства РФ (федеральная целевая программа «Развитие транспортной системы России в 2010 – 2015 годах») [1]. Интерес к проблеме организации движения общественного транспорта растет вместе с усложнением схемы транспортных потоков, возросшей конкуренцией в данной отрасли и динамикой изменения пассажиропотока. На сегодняшний день развитие и эффективное управление транспортом немислимо без разработки и применения интеллектуальных систем управления. Во многих странах мира широкое развитие получили Интеллектуальные транспортные системы (ITS), целью которых является решение таких задач как маршрутизация транспортных потоков в реальном времени с учетом различных динамических факторов, повышение информированности участников дорожного движения о транспортных ситуациях и др. [2].

Процесс перевозки пассажиров городским транспортом основывается на соблюдении графика движения транспортных средств по маршрутам в соответствии с составленным заранее расписанием движения. Но этот процесс также находится под влиянием многих неформальных нечетких факторов (например, пробки, пассажиропоток, структура маршрута, погодные условия и т.п.), которые могут стать причиной отклонения от заранее установленного расписания и маршрута. Это приводит к снижению качества обслуживания и увеличению времени ожидания общественного транспорта (ОТ) пассажиром, что в итоге способствует отказу от использования ОТ [3].

Авторами предлагается подход к построению адаптивной системы маршрутизации передвижений пассажиров общественным транспортом в городских условиях. В основу подхода положены нейросетевые модели, генетические алгоритмы и данные спутникового мониторинга транспорта.

Обзор литературы

Проблема маршрутизации транспорта (VRP – Vehicle Routing Problem) широко обсуждается в литературе. Первые исследования по проблеме появились еще в начале 70-х гг. прошлого века [4, 5]. Нейронные сети стали использоваться для решения прикладных проблем транспортного обслуживания практически с момента своего появления.

В [6] рассматривается нейросетевая модель для оценки времени движения по участкам маршрутов общественного транспорта. Авторами применяется сеть радиально базисных функций. Используемый входной вектор учитывает довольно большое количество факторов, но не содержит сведений о погодных факторах. Авторы заявляют о максимальной ошибке измерения средней скорости в 4.5 км/ч при использовании представленной модели.

В [7] вместо нейросетевого подхода авторами применяется алгоритм оценивающий время движения автобусов на основе исторических данных о его скорости на каждом участке пути по формуле

$$v = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} v_{ai} + v_r}{n},$$

где v_{ai} – средняя историческая искорость на сегменте i ; v_r – текущая скорость, полученная с помощью GPS. В комплексе с данным алгоритмом используются конечные автоматы для обработки внештатных ситуаций (сходы с маршрута, изменение маршрута и т.п.). Максимальная погрешность измерений составляет 10%.

В [8] автором описывается применение генетических алгоритмов к процессу выбора рационального маршрута движения городским общественным транспортом. Недостатком данной работы является привязка к фиксированному времени движения пассажиров между остановками, что невозможно в реалиях большинства российских городов.

Таким образом, спектр подходов и методов, используемых для оценки времени движения общественного транспорта (ОТ), достаточно широк, но ни один из описанных подходов не рассматривается как комплекс алгоритма прогноза времени движения и выбора рациональных маршрутов движения общественным транспортом либо не учитывает в полной мере влияние различных взаимосвязанных нечетких факторов.

Постановка задачи

При постановке и формализации задачи выборы рациональных маршрутов движения ОТ используется теоретико-множественный подход [9].

Задан граф городской транспортной сети

$$\Gamma = (K, L), \tag{1}$$

где $K = \{K_{ij} / i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J_i}\}$ – множество опорных точек (остановки, перекрестки и др.), здесь i, j – индексы транспортных маршрутов и опорных точек соответственно,

$$L = |l_{ii'jj'}|, i, i' \in I, j, j' \in J_i. \text{ – транспортные коммуникации} \tag{2}$$

Заданы транспортные средства на i -х маршрутах

$$R = \{R_{in\delta} / n = \overline{1, N}, i = \overline{1, I}\}, \tag{3}$$

где n – индексы транспортных средств на маршрутах $i \in I$, δ – типы транспортных средств (автобус, трамвай, троллейбус и др.)

Известно время τ_{ij} нахождения n -х транспортных средств на i -х маршрутах в j -х опорных точек на временном интервале T , $\tau_{ijn} \in T_\xi, \forall i \in I, j \in J_i, n \in N$.

Для формализации задачи выбора пути в транспортной системе города введем переменные.

Если существует опорная точка начала движения (начало пути)

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } K_{ij} \in K, i \in I, j \in J_i \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \tag{4}$$

Если существует опорная точка окончания движения (конца пути)

$$y_{i^*j'} = \begin{cases} 1, & \text{если } K_{i^*j'} \in K, i^* \in I, j' \in J_i \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \tag{5}$$

Если существует возможность движения между опорными точками в транспортных маршрутах

$$U_{ii'jj'}^n = \begin{cases} 1, & \text{если } l_{ii'jj'} > 0, n \in N, i, i' \in I, j, j' \in J_i \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \tag{6}$$

Необходимо определить

$$\min \sum_{ii'jj'} t_{ijn} z_{ij} y_{i^*j'} U_{ii'jj'}^n \text{ при условиях} \tag{7}$$

$$\sum_{j \in J_i} z_{ij} = 1, i \in I \tag{8}$$

$$\sum_{j' \in J_{i^*}} y_{i^*j'} = 1, i^* \in I \tag{9}$$

$$\sum_{j \in J_i, j' \in J_{i'}} U_{ii'jj'}^n = 1, i, i' \in I \tag{10}$$

Сформулированная задача (7)-(10) представляет значительную сложность, которая обуславливается её нелинейным, нечетким и динамическим характером. Возможность её решения как классическими, так и целочисленными методами не представляется возможным.

Для решения поставленной задачи авторы предлагают подход, который состоит в комплексном использовании нейросетевых и генетических моделей, методов и алгоритмов для выбора рациональных маршрутов движения ОТ в реальных условиях.

Следует отметить, что при постановке задачи выбора маршрута (7)-(10) могут быть использованы различные критерии и условия, например материальные издержки, удобство передвижения для маломобильных пассажиров и др.

Предлагаемый подход к решению задачи (7)-(10) включает выполнение следующих взаимосвязанных этапов:

1. Сбор и обработка телеметрических данных о движении транспортных средств с помощью систем спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS на интервалах $T_\xi \in T$
2. Построение объектно-ориентированного графа $\Gamma(K,L)$ транспортной сети
3. Получение реальных значений τ_{ij} с помощью приемников ГЛОНАСС/GPS данных, $\forall i \in I, j \in J_i$
4. Синтез структуры нейросетевой модели (НСМ) с учетом $\Gamma(K,L)$
5. Формирование множества входных X и выходных Y векторов $X_j Y_j, j \in J$ на интервалах $t_\xi, t_\xi \in T, \xi \in \xi_0$.

$$X = \{X_\xi / \xi = \overline{1, \xi_0}\}, X_\xi = \{\tau_{ij} / i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}\}$$

$$Y = \{Y_\xi / \xi = \overline{1, \xi_0}\}, Y_\xi = \{\tau_{ij}^{\xi+1} / i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}\}$$

6. Обучение НСМ с использованием векторов X и Y .
7. Определение состояний временного графа $\Gamma_\xi(K, Q_\xi)$ транспортной сети города путем прогноза времени нахождения ТС с на временных срезах t_ξ с использованием НСМ, $Q_\xi = \{\tau_{ij}^\xi\}, Q_\xi \subset T$.
8. Выбор рационального маршрута движения в графе Γ транспортной сети города на множестве временных срезов (решение задачи (7)-(10)).

Сложность рассматриваемой задачи (7)-(10) обусловлена как её динамическим характером, так и множественным характером различного рода нечетких факторов, влияющих на движение ОТ [10, 11]. Кроме того, значения τ_{ij} , полученные со спутников, требуют дополнительной обработки из-за разного рода искажений, возникающих при отражении сигнала от городских сооружений в условиях плотной застройки.

Обработка геоинформационных данных

Геолокационные данные движения общественного транспорта представляют собой данные от устройств ГЛОНАСС/GPS-навигации. С помощью таких устройств в режиме реального времени фиксируется положение транспортного средства на маршруте, его скорость, количество и длительность остановок, форс-мажорные ситуации и т.п. Основными являются данные τ_{ij} о положении R_{in} в каждый конкретный период времени. Но сбор таких данных сопряжен с определенными трудностями по причине большого количества возникающих при сборе помех [12].

Причиной возникновения помех в городских условиях является плотная застройка, вследствие которой сигнал постоянно отражается от зданий и сооружений, фиксируясь искаженным на устройствах сбора спутниковых данных. На рис. 1 представлен фрагмент телеметрических данных о движении транспортного средства в условиях плотной городской застройки, подверженный влиянию искажений, возникающих при отражении ГЛОНАСС/GPS сигнала от зданий и сооружений. Задача обработки таких геоинформационных данных имеет самостоятельное значение [13].

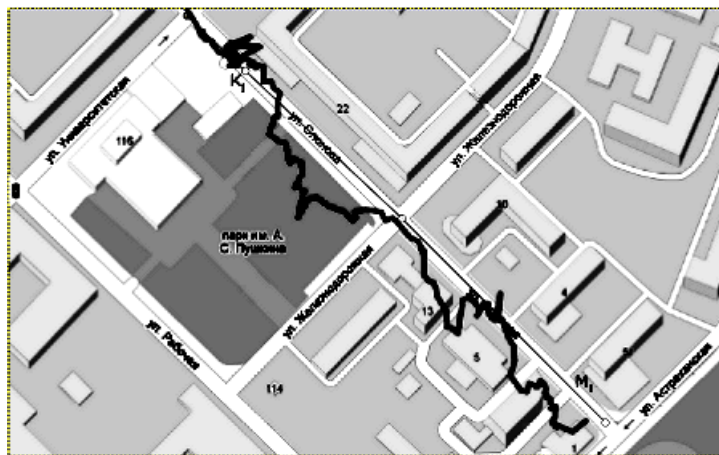


Рис. 1. Фрагмент телеметрических данных о движении транспортного средства

В общем случае предлагается следующий подход к задаче фильтрации геоданных о нахождении транспортных средств M_i в опорных точках K_{ij} . Данные, получаемые со спутниковых приборов, представляются в виде множества полигональных кривых для графа Γ транспортной сети.

$$\forall M_i = \{P_{n_i} / n = \overline{1, N_i}, i \in I\}, \forall i \in I \quad (11)$$

Множество контрольных точек, в совокупности представляющих собой эталонную полигональную кривую:

$$K = \{K_j / j = \overline{1, J}\} \quad (12)$$

Общий алгоритм обработки входных данных состоит из следующих этапов:

1. Разбиение исходной кривой на несколько участков W , по числу контрольных точек
- 2.

$$P = \bigcup_{\omega \in P} W_{\omega}, \text{ где } \omega - \text{индекс участка полигональной кривой}$$

3. Для каждой опорной точки K_{ij} выполняется поиск ближайшей точки в исходной полигональной кривой, такой, что

$$\forall K_i \exists P_n, K_j - P_n \leq r, \text{ где } r - \text{допустимое отклонение точки}$$

4. Определение проекции исходной точки полигональной кривой на соответствующий участок U_j эталонного маршрута:

5.

$$P' \in K_j K_{j+1}, [P_j P'_j] \perp K_j K_{j+1}, \text{ где } P' \in P_n \quad (13)$$

6. Исключение из полигональной кривой точек P'_j , проекции которых не соответствуют по времени формируемому маршруту.

Рассмотренный метод фильтрации данных, получаемых с приборов спутниковой навигации, позволяет уменьшить погрешность при обработке исходных данных для моделирования, таких как моменты времени τ_{ij} нахождения транспортных средств на i -х маршрутах в j -х остановках, средней скорости движения транспортных средств на маршрутах и др. Первая версия программного комплекса, реализующего предлагаемый подход к обработке геоинформационных данных в городской транспортной сети, разработана и зарегистрирована [13].

Нейросетевая модель

Для запоминания, хранения и прогноза динамических состояний транспортной системы в реальных условиях используется нейросетевая модель (НСМ) двухуровневой структуры [14, 15].

Обучающее множество задается в виде (X, Y) и включает множество входных X и выходных Y векторов для обучения модели и представляются следующим образом:

$$X = \{X_{\xi} / \xi = \overline{1, \xi_0}\},$$

где ξ – индексы временных интервалов (временных срезов) $t_{\xi} \in T$, задаваемых с учетом скважности движения транспортных средств по маршрутам $M_i, \forall i \in I$.

Структура обучающих векторов X имеет вид $X = \{X_{\varphi} / \varphi = \overline{1, \varphi_0}\}$, где φ – индекс составляющих входного вектора, включая значения реального времени $X_{\varphi} \in X_{\xi}$ нахождения ТС на остановках, а также значения сезонных, погодных, дорожных, календарных и прочих факторов.

Множество выходных векторов $Y = \{Y_{\beta} / \beta = \xi + 1, \xi = \overline{1, \xi}\}, \beta \in \xi_0$, описывают состояние транспортной сети на последующих временных срезах t_{ξ} .

Количество обучающих пар X_{ξ}, Y_{ξ} НСМ соответствует числу $\xi_0 - 1$ временных срезов t_{ξ} на интервале времени T .

Для установления связей между вершинами входного и скрытого слоев НСМ авторами предлагается зонный подход, заключающийся в разбиении транспортной системы города на виртуальные зоны, между которыми происходит пассажирское сообщение. Количество зон выбирается с учетом особенностей конкретной транспортной сети. В качестве примера на рис. 3 приведена транспортная сеть города Саратова, представленная в соответствии с зонным подходом.

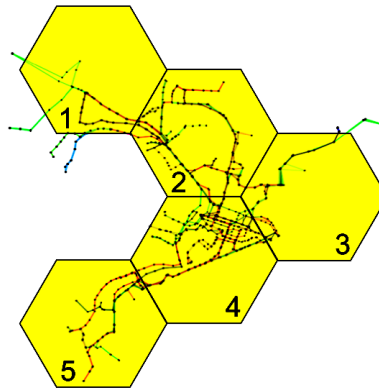


Рис. 2. Граф транспортной сети города

Формирование скрытого слоя НСМ на основе зонного подхода позволяет снизить количество связей между входным и скрытым слоями путём исключения узлов транспортного графа, находящихся вне граничащих зон. Структура нейросетевой модели представлена на рис. 2.

Все собранные данные нормализуются в пределах $(0,1)$, что позволяет повысить скорость обучения и минимизировать влияние слишком больших или слишком малых величин друг на друга в процессе обучения.

В процессе обучения на вход НСМ последовательно подаются векторы X_ξ , $\xi = \overline{1, \xi_0}$. Обучение модели выполняется на каждый выходной вектор Y_β , $\beta = \xi + 1$. Процедура обучения выполняется постоянно для полного набора временных срезов с учетом списка факторов и запоминается в базе знаний системы [16].

Мощность обучающего множества (X, Y) зависит от интервала предыстории T и возрастает с увеличением продолжительности наблюдения работы транспортной системы на временных срезах t_ξ .

НСМ в данном случае позволяет запоминать состояния транспортной сети в виде множества значений времени нахождения транспортных средств M_i на остановках K_{ij} в пределах временных срезов t_ξ , $\forall \xi \in \xi_0$ на интервале истории наблюдения $T_0 = \{T_s/S = \overline{1, S_0}\}$. Это позволяет использовать НСМ в задачах выбора рациональных маршрутов движения пассажиров в транспортной системе на основе прогноза состояний системы на последующих временных срезах $t_\xi \in T_s, T_s \in T_0$.

Выбор маршрута

Результатом обучения нейронной сети является возможность прогноза состояния транспортной системы на задаваемых при обучении временных срезах $t_\xi \in T$. Таким образом появляется возможность выбора маршрута движения пассажира в соответствии с транспортной ситуацией на множестве временных срезов, на каждом из которых транспортная ситуация представляется в виде множества величин реального времени $\tau_{ij}^\xi \in Q_\xi$ нахождения транспортных средств на остановках определенных маршрутов. В этом случае сформулированная задача (7)-(10) может быть представлена как частный вариант гамильтоновой задачи выбора пути в динамическом ориентированном графе городской транспортной сети Γ на множестве временных срезов, значения атрибутов вершин и их взаимосвязи изменяются на каждом временном срезе t_ξ . Решение этой задачи крайне затруднено из-за очень высокой размерности. В городской транспортной системе крупного города существует более 10^2 маршрутов, а количество остановок на каждом из них достигает 50. При выборе маршрута движения в такой системе на множестве временных срезов, равных 10, размерность задачи выбора маршрута может достигать 10^5 . При этом увеличение числа временных срезов приводит к резкому увеличению размерности задачи. В этом случае решение этой задачи существующими целочисленными методами в оперативном режиме является крайне затруднительным.

Авторами предлагается подход к выбору маршрута движения в транспортной сети города, в основу которого положен эволюционный генетический алгоритм. Начальная популяция формируется в виде альтернативных маршрутов движения по данным, получаемым в результате отклика обученной НСМ по состоянию транспортной системы города на временных срезах $t_{\xi+1} \in T$ для всех транспортных маршрутов. Алгоритм скрещивания выполняется с учетом функции мутации в соответствии с условиями (8)-(10). Оценка и отбор предпочтительных решений выполняются в соответствии с критерием (7). В настоящее время авторами исследуется эффективность различных функций скрещивания при использовании эволюционных генетических алгоритмов выбора маршрута движения. Результаты исследования генетических алгоритмов при решении рассматриваемой задачи заслуживают самостоятельного рассмотрения.

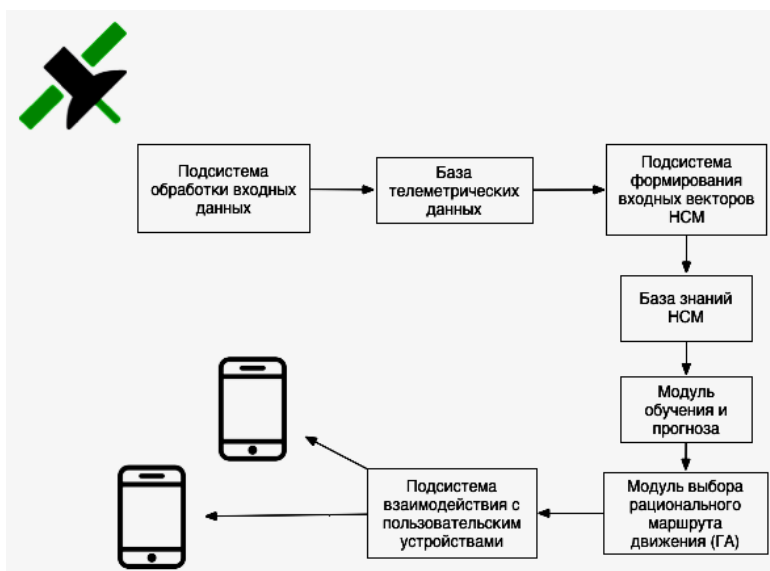


Рис. 2. Структурная схема интеллектуальной системы

При проведении экспериментов был использован фрагмент городской транспортной системы города Саратова. Для проведения эксперимента были выбраны 5 маршрутов ОТ, общее количество остановок – 137. Сбор данных для обучений нейросетевой модели проводился пассажирами общественного транспорта, участвовавшими в эксперименте с помощью мобильных устройств (телефонов, смартфонов) и специализированного приложения, разработанного магистрантом кафедры ИБС СГТУ Друзиной М.О. в рамках магистерской диссертации под руководством авторов. Тестовый набор представляет собой около 150 тестовых образцов телеметрических данных движения пяти маршрутов ОТ. Тестовые образцы собирались при различной дорожно-транспортной ситуации и погодных условиях и обрабатывались описанным ранее алгоритмом фильтрации. Для выбора маршрутов движения используется эволюционный генетический алгоритм. Результаты моделирования представлены в таблице.

Результаты моделирования

Мощность входного вектора	Время обучения, с	Точность, %
137 + 23	32400	82

В результате проведенных исследований были предложены нейросетевая модель для прогнозирования состояний транспортной системы на задаваемых временных интервалах с учетом нечетких факторов (дорожных условий, погодных факторов, календарных характеристик и т.п.) и генетический алгоритм выбора рациональных маршрутов движения пассажиров в городской транспортной системе. Результаты исследований были представлены в [10, 13], а также были зарегистрированы в качестве программы для ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. О федеральной целевой программе «Развитие транспортной системы России (2010-2015 гг.): постановление Правительства РФ от 05.12.11 № 848 // Собрание законодательства Российской Федерации. 2001. № 512. Ст. 4895.
2. Overview of Intelligent Transport Systems (ITS) developments in and across transport modes / G. A. Giannopoulos et al., 2012.
3. Вучик В. Р. Транспорт в городах, удобных для жизни / В. Р. Вучик. М.: Территория будущего. 2011.
4. Christofides N. An algorithm for the vehicle dispatching problem / N. Christofides, S. Eilon // Operational Research Quarterly. 1969. № 20. P. 309-318.
5. Christofides N. The vehicle routing problem / N. Christofides, A. Mingozzi, P. Toth // Combinatorial optimization / Christofides N., Mingozzi A., Toth P., Sandi C., editors. London: Wiley, 1979. 220 p.
6. Salvo G. Bus speed estimation by neural networks to improve the automatic fleet management / G. Salvo, G. Amato, P. Zito. 2007.

7. Predicting bus arrival time on the basis of global positioning system data / D. Sun et al. // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2007. Т. 2034. №. 1. С. 62-72.
8. Jun C. Route selection in public transport network using GA / C. Jun // Proc. 2005 ESRI International User Conference, San Diego, California (July 25-29, 2005).
9. Цвиркун А.Д. Основы синтеза структуры сложных систем / А.Д. Цвиркун. М.: Наука, 1982.
10. Хействер А.А. Подход к разработке системы поддержки выбора маршрутов движения городским общественным транспортом / А.А. Хействер, В.П. Костюк // ММГТ-26: сб. тр. Т. 9. Саратов: СГТУ, 2013.
11. Введение в математическое моделирование транспортных потоков: учеб. пособие / Гасников А.В., Кленов С.Л., Нурминский Е.А., Холодов Я.А., Шамрай Н.Б. М.: МФТИ, 2010.
12. Оганесян А. А. Особенности функционирования приемников спутниковой навигации в городских условиях / А. А. Оганесян, А. С. Морозов, С. Ю. Аксенов // Электросвязь. 2008. № 9.
13. Хействер А.А. Метод фильтрации геоданных в системе выбора рационального маршрута движения транспортом / А.А. Хействер, В.П. Костюк, М.О. Друзина // ММГТ-27: сб. тр. Т. 9. Саратов: СГТУ, 2014.
14. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника. Теория и практика / Ф. Уоссермен. М.: Мир, 1992.
15. Еськин А.О. Разработка и исследование параллельных нейросетевых моделей для диагностики сложных систем / А.О. Еськин, В.П. Костюк // Вестник СГТУ. 2013. № 4. С. 142-150.
16. Riedmiller M. A direct adaptive method for faster backpropagation learning: The RPROP algorithm / M. Riedmiller, H. Braun. San Francisco, 1993.

Костюк Валерий Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Valery P. Kostyuk – Ph. D., Associate Professor
Department of Information Security of Automated Systems,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Хействер Антон Алексеевич – аспирант кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Anton A. Kheystver – Postgraduate
Department of Information Security of Automated Systems,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 17.02.15, принята к опубликованию 11.05.15

УДК 519.213

В.Б. Куликов

РЕКОНСТРУКЦИЯ ФУНКЦИЙ ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ НА МОДЕЛЬНЫХ ВЫБОРКАХ. РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ

Идентифицируются функции плотности вероятности модельных выборок ограниченного объема. Задача верификации решается для оценки предложенного метода восстановления полимодальных плотностей. Выполняется регуляризация задачи. Подтверждается вывод о необходимости увеличенного числа гладких функций для восстановления сложных (Коши, экспоненциальное) распределений. Предложенный подход носит универсальный характер в сфере естествознания, медицине и технических приложениях.

Идентификация законов распределения, модельные выборки, уравнение Фредгольма первого рода, регуляризация

V.B. Kulikov

RECONSTRUCTION OF PROBABILITY DENSITY FUNCTIONS USING MODEL SAMPLES AND TASK REGULARIZATION

The paper deals with identification of the probability density function for a set of model samples. The verification problem is solved to evaluate the proposed method of restoring multimodal distribution densities. Regularization of the problem is performed. The necessity for an increased number of smooth functions to recover complex (Cauchy and exponential) distributions is confirmed. The proposed approach is universal in the field of sciences, medicine and engineering.

Identification of distribution laws, model selection, the Fredholm equation of the first kind, regularization

Проблема достоверной и надежной идентификации стохастических данных проявляется в таких сферах исследования, как естествознание, квантовая механика, медицина, геохимия. Здесь существует множество сложных по своей природе структур и процессов, при исследовании которых применяются различные методы идентификации законов, описывающих их стохастические или фрактальные характеристики. Этим задачам явления многофакторности, многоэкстремальности присущи в силу внутренней органичности.

Особенностью таких объектов изучения является наличие сингулярных и полимодальных, негауссовых распределений. Например, в иммунологии идентифицируются распределения с числом мод 2-3; в методах получения высокочистых веществ известны примесные распределения с 3-5 модами; в моделях, описываемых на основе решений уравнения Шрёдингера для квантовых систем их может быть значительное число. Сингулярные распределения вероятности характерны для диссипативных динамических систем с т.н. «странными аттракторами». При этом в прикладных задачах до сих пор широко используются методы построения гистограмм и проверки статистических гипотез.

Однако для идентификации законов распределения с указанной спецификой наиболее перспективными являются методы, основанные на решении обратных задач математической физики [1]. Закономерно, что наблюдается расширение сферы применения устойчивых алгоритмов и программного обеспечения для приближенного решения обратных задач стохастического анализа, основанных на интегральном уравнении Фредгольма I рода [2]. В ходе решения подынтегральная функция плотности вероятности $p(x)$ является искомой величиной задачи, правая часть уравнения соответствует эмпирической функции распределения $F(x)$.

На примере решения задачи обработки экспериментальных данных в иммунологии автором делается вывод, что данный метод восстановления плотностей распределения в технических приложениях, медицине, биологии, агроффере, при получении высокочистых веществ, геохимии и в других сферах является наиболее перспективным.

Следует заметить, что предлагаемый подход принципиально отличается от классической схемы: не требует построения гистограмм, выбора числа и ширины интервалов группирования данных, аппроксимации построенной гистограммы и применения критериев согласия для проверки гипотез относительно закона распределения.

Приближенное решение уравнения Фредгольма по выборкам малого объема позволяет корректно (на основе алгоритмов регуляризации) сразу построить кривую плотности распределения изучаемой случайной величины, минуя этап построения гистограмм (рис. 1, 2 показывают функции плотности вероятности $p(x)$).

Оценка плотности распределения показателей ищется в виде разложения по системе тригонометрических функций с ограничением количества членов разложения N в зависимости от объема L наблюдаемых данных минимизацией гарантированного риска. Накладываются регуляризационные ограничения на решения – непрерывность законов распределения изучаемых показателей, их сосредоточенность на некотором отрезке, гладкость формы плотности распределения.

Метод восстановления законов распределения в иммунологии [2] положительно зарекомендовал себя в плане вычислительной устойчивости, разрешающей способности по выделению и правильному позиционированию локальных особенностей. Однако для повышения верифицируемости предложенного метода выполнены исследования на «образцовых» выборках, моделирующих различные плотности распределения случайных величин.

Компьютерное моделирование выборок наиболее полно реализуется с помощью комплекса программ, разработанного в [3]. Используя отсчеты модельных случайных величин, относящихся к распределениям: Коши, гамма-распределению, экспоненциальному, нормальному, Вейбулла, реконструировались функции плотности вероятности по предложенному методу. Объем выборок имел диапазон 100-300 единиц. Выполнено также восстановление плотности смеси трех нормальных распределений при $L = 600$.

Результаты исследований подтверждают вывод [2] о наличии особенностей сложных (Коши, экспоненциальное) распределений, выражающихся в необходимости увеличенного числа гладких функций для восстановления приближенного решения: для Коши – примерно 20 гармоник, для экспоненциального 10-23. В последнем случае форма кривой распределения закономерно улучшается с увеличением объема выборки от 100 до 300 (рис. 1).

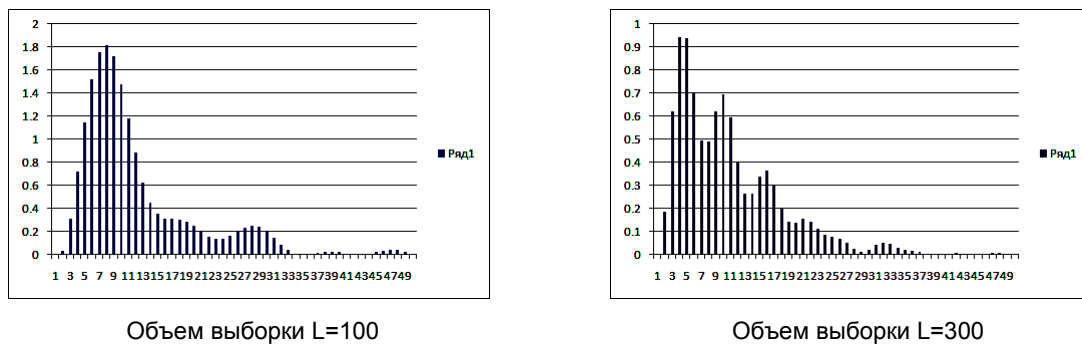


Рис. 1. Графики $p(x)$ восстановленных экспоненциальных распределений

Вывод об улучшении формы с ростом объема выборки закономерен и для нормального закона (исчезает асимметрия и приподнятый «хвост»). Хотя в монографии [3] уже для $L = 100$ критерии согласия типа χ^2 дают хорошее соответствие принадлежности выборки к распределению Гаусса.

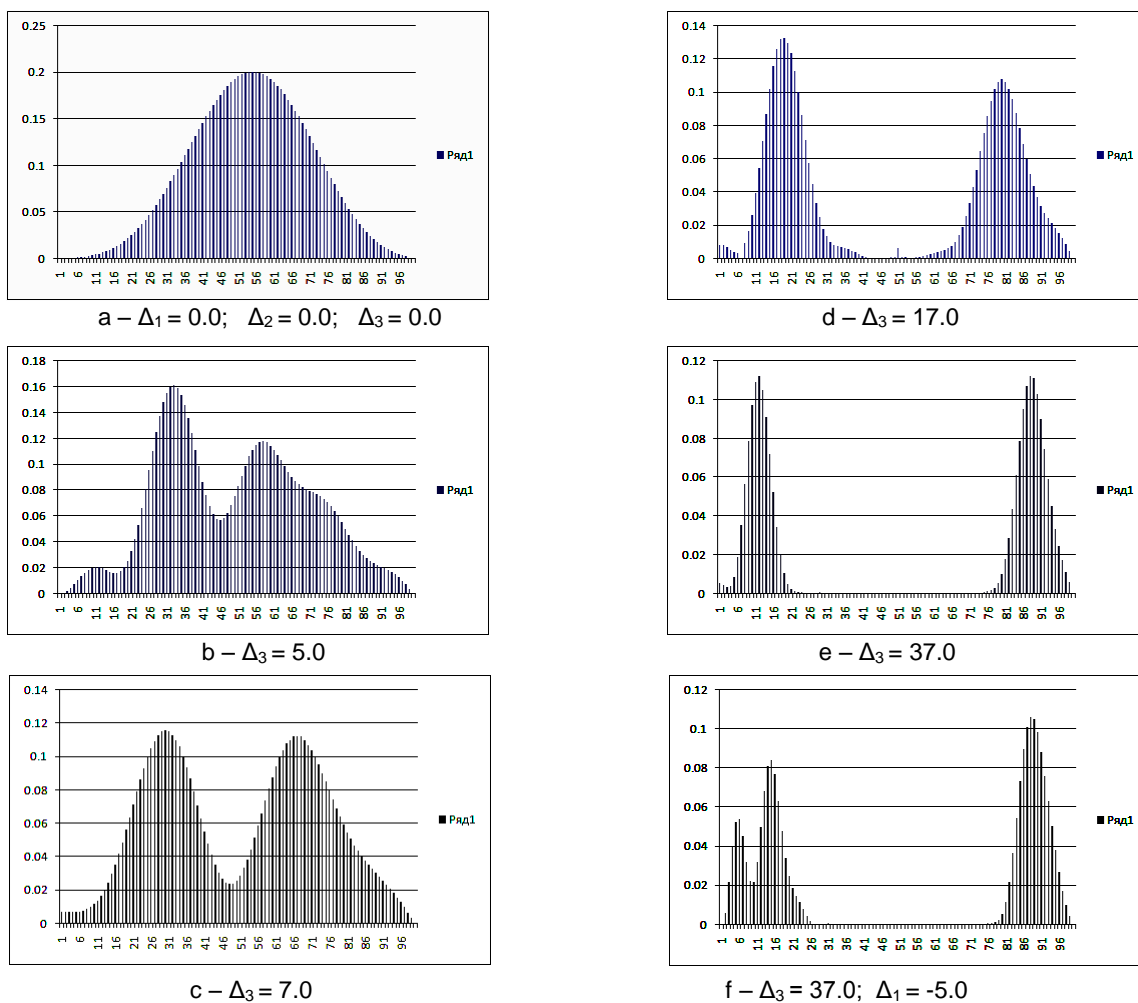
Предлагаемый метод принципиально выделяет главное отличие для выборок, сгенерированных по нормальному типу (исследовались объемы с $L = 100, 200, 300, 600$) – число членов N восстановленного решения при достижении минимума критерия эмпирического риска мало – и находится в диапазоне: $N=2-4$. При этом коэффициенты разложения решения по системе тригонометрических функций для выборки в 200 единиц имеют, к примеру, значение: $\alpha = 0.01393$; $\beta = -0.83330$; $\gamma = -0.50181$.

На основании исследований можно заключить, что обнаружено особое статистическое свойство распределений нормального типа. «Колокольная» форма распределения Гаусса, правило «трех сигм», максимальное значение энтропийного коэффициента ($k = 2.066$) дополняются новым характерным признаком идентификации.

Особый интерес представляет анализ смеси трех выборок, каждая из которых смоделирована в [3] по нормальному закону. Первая выборка в 100 отсчетов изначально сосредоточена на отрезке $(-0.668; 2.296)$, вторая (200 отсчетов) – на отрезке $(-3.997; 6.338)$, третья (300 отсчетов) – на отрезке $(-5.185; 6.218)$. Реконструкция кривой распределения суммарной выборки в 600 единиц снова дает нормальное распределение.

Об этом свидетельствуют структура функции и число членов N восстановленного решения ($N=4$). Далее, зафиксировав первую и вторую выборки, сдвигаем вправо по оси значений третью, прибавлением к каждому ее отсчету «математических ожиданий» из ряда значений $\Delta_3 = 5.0, 7.0, 17.0, 37.0$. Последовательно восстанавливаем по предложенному методу все четыре распределения, причем два последних варианта отражают существенное взаимное смещение локальных выборок по интервалу их значений.

Графики восстановленных $p(x)$ «смесей» нормальных распределений приведены на рис. 2. Показано, что в этом случае возрастает «сложность» корректной реконструкции совокупной плотности вероятности с увеличением требуемых членов разложения с $N=7-10$ до $N=13-23$. Фигура f соответствует $\Delta_1 = -5.0$; $\Delta_3 = 37.0$ – первая выборка смещена влево на пять единиц; третья – на 37 единиц, т.е. реконструируется трехмодальное распределение.

Рис. 2. Графики $p(x)$ восстановленных «смесей» нормальных распределений

Выводы

Выполненная идентификация эмпирических полимодальных распределений по выборкам малого объема изложенным способом позволяет считать его перспективным в области медицины, биологии и естествознании в целом. Результаты восстановления плотностей моделируемых распределений: гамма-распределение, Коши, экспоненциальное, нормальное, Вейбулла с ограниченным объемом выборок прикладного значения демонстрируют высокие возможности метода; его универсальность и эффективность. Способность метода давать новые знания о «тонкой» природе стохастических явлений предлагается широко использовать в теории вероятностей и прикладной математической статистике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. М.: Наука, 1986. 288 с.
2. Куликов В.Б. Идентификация одномерных многомодальных плотностей распределения вероятности при ограниченном объеме данных методом регуляризации / В.Б. Куликов // Вестник СГТУ. 2013. № 3 (72). С. 7-11.
3. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход: монография / Б.Ю. Лемешко, С.Б. Лемешко, С.Н. Постовалов, Е.В. Чимитова. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. 888 с.

Куликов Владимир Борисович – аспирант Института радиоэлектроники и информационных технологий Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева

Vladimir B. Kulikov – Postgraduate Institute of Radioelectronics and Information Technology, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University

Статья поступила в редакцию 03.02.15, принята к опубликованию 11.05.15

И.В. Михеев, Д.В. Кондратов, О.В. Виштак

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДУЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ТЕСТИРОВАНИЯ УЧЕБНЫХ ПРОГРАММ

Рассматривается построение компьютерного тестирующего комплекса для проверки правильности выполненных заданий по дисциплинам курса программирования, а также методы динамического тестирования, стадии тестирования. Разработана схема работы тестирующего модуля на примере потока данных. Обоснован выбор метода тестирования.

Компьютерная тестирующая система, оптимизация процесса обучения, методы тестирования программ, динамическое тестирование, технология тестирования

I.V. Mikheyev, D.V. Kondratov, O.V. Vishtak

SOFTWARE IMPLEMENTATION UNIT COMPLEX DYNAMIC TESTING TESTED APPRENTICESHIP PROGRAMS

The construction of complex computer testing to verify assignments in the disciplines of a programming course. We consider methods for dynamic testing. Testing stage. A scheme for the module testing operation example data stream. The choice of the test method.

Computer testing system, optimizing the learning process, methods of testing programs, dynamic testing, testing technology

В настоящее время изменяющиеся запросы личности, ожидания общества и требования государства в сфере образования определяют высокую значимость реализации ФГОС нового поколения по всем вузовским образовательным программам, включая подготовку выпускников в сфере IT-технологий. Одной из базовых функций ФГОС нового поколения является критериально-оценочная функция, которая обуславливает необходимость разработки процедур оценки образовательных результатов обучающихся и выпускников. Таким образом, особое внимание в настоящее время уделяется разработке оценочных и методических материалов, которые являются основными компонентами фонда оценочных средств по образовательной программе.

Изучение IT-технологий имеет явно выраженную специфику: наличие не одного, а нескольких отличающихся друг от друга объектов изучения: информация и информационные процессы, устройство компьютеров, способы построения алгоритмов, информационные модели, информационные технологии и информационные системы; компьютер при изучении информационных дисциплин является объектом изучения и в то же время средством обучения и инструментом решения задач; усвоение существенного объема знаний происходит за счет активного использования компьютера, что существенно изменяет функции преподавателя и студента и смещает акценты в учебной деятельности с совместной (аудиторной) на самостоятельную; темпы развития всех направлений информатики и информационных технологий очень велики. Стремительное развитие программного, аппаратного обеспечения приводит к тому, что программные продукты быстро устаревают. В связи с этим в обучении программированию требуется сбалансированное сочетание изучения общих принципов назначения и построения программных средств с конкретными особенностями данного продукта [1, с. 44].

Эти специфические особенности изучения информационных дисциплин выдвигают на первый план проблемы формирования у студентов политехнических умений при изучении технических и инструментальных средств, развитие умений и навыков их самостоятельной учебной деятельности; а также проблему создания и актуализации оценочных и методических материалов, которые позволят преподавателю оперативно и систематически контролировать учебную деятельность студентов, причём процедуру оценки знаний и умений студентов при изучении информационных дисциплин, включая программирование, следует автоматизировать за счёт использования компьютерных тестирующих систем. Именно такой подход позволит оптимизировать процесс проверки разработанных студентами учебных программ, не снижая при этом, а, наоборот, значительно повышая качество освоения области разработки программ.

В дидактическом цикле обучения программированию выделим этап контроля знаний студен-

тов и их умений по разработке программ, причём контроль осуществляется систематически на каждом практическом занятии, а также при проведении всех контрольных мероприятий, включая защиты практических работ, коллоквиумы, зачёты, экзамены, олимпиады и разработку программ, предусмотренных техническим заданием на выполнение выпускной квалификационной работы.

Для решения этой актуальной проблемы нами разрабатывается автоматизированная система тестирования учебных программ, которая позволяет оптимизировать процедуры оценки знаний и умений студентов по программированию и минимизировать время оценки результатов выполненных заданий. Одним из основных модулей этой системы выделим тестирующий модуль.

Учитывая особенности учебных программ, которые создаются по заданию преподавателя, их можно рассматривать как «черный ящик», поэтому преподаватель предоставляет обучающимся четкую постановку задачи, уделяя особое внимание описанию форматов входных и выходных параметров, типам входных величин и диапазонам их допустимых значений, ограничение времени на выполнение программы говорит о том, что выбранный алгоритм реализации является правильным и оптимальным.

Для корректного функционирования модуля были выделены и должны соблюдаться следующие ограничения: [2].

- весь исходный код программы должен храниться в одном файле с расширением .cpp;
- все части программы должны быть функционально законченными;
- программа должна иметь только одну точку входа, которой является функция `main()`;
- алгоритм программы не должен каким-либо образом модифицировать непосредственно входные параметры программы;
- для ввода и вывода данных может использоваться только стандартный поток ввода/вывода;
- выходные данные могут быть сформированы только в формате строки. При необходимости вывода нескольких параметров может быть использован спецсимвол;
- количество входных параметров может быть не ограниченным.

Предваряя практическую реализацию модулей автоматизированной системы, нами был проведён анализ методов и средств тестирования программ. На основании этого анализа в разрабатываемом программном обеспечении использовали один из самых надёжных методов контроля качества и правильности функционирования разработанных программ – тестирование [8]. Использование этого метода предопределило особенность разрабатываемой тестирующей системы: при определении правильности функционирования разработанных учебных программ применяется совокупность методов, а именно статический и динамический, причём статический метод используется по заранее определённый алгоритму, а динамический метод предполагает некоторый случайный характер, потому что используется набор входных данных на основе псевдослучайной генерации. Также применение динамического метода обусловило использование эталонной программы. Тем самым выполняется не только процесс тестирования, но и формируются рекомендации по оптимизации тестируемой учебной программы, что позволяет реализовывать оценочные процедуры знаний и умений обучающихся по разработке программы.

Рассмотрим функционирование модуля динамического тестирования. На рис. 1 представлен алгоритм функционирования данного модуля.

Работу модуля динамического тестирования условно можно разбить на три основных этапа:

- этап последовательного запуска эталонной и студенческой программ;
- этап передачи выполняемым программам исходных входных параметров;
- этап сравнительного анализа выходных данных программ и выдача результата.

На этапе запуска программ происходит последовательный программный вызов предварительно скомпилированных исполняемых файлов эталонной и студенческих программ.

На этапе передачи выполняемым программам выходных параметров в первую очередь происходит генерация набора входных параметров случайным образом посредством специально реализованного алгоритма. Для каждого класса программ генерируется необходимое количество входных параметров, вероятность совпадения которых на каждом новом этапе генерации крайне мала. Таким образом, достигается высокая степень корректности и неповторяемости генерируемых наборов входных параметров. Разработанный алгоритм предполагает генерацию следующих видов и диапазонов данных:

- сгенерировать ноль;
- сгенерировать положительное целое число;

- сгенерировать отрицательное целое число;
- сгенерировать положительное вещественное число;
- сгенерировать отрицательное вещественное число;
- сгенерировать целое число в диапазоне от минус до плюс бесконечности;
- сгенерировать вещественное число в диапазоне от минус бесконечности до плюс бесконечности.

На этапе сравнительного анализа происходит линейное сравнение результатов выполнения программ (выходных параметров). В случае если выходные параметры обеих программ идентичны, можно сделать вывод о том, что студенческая программа выполнена корректно, не содержит ошибок и полностью соответствует предъявляемым требованиям.

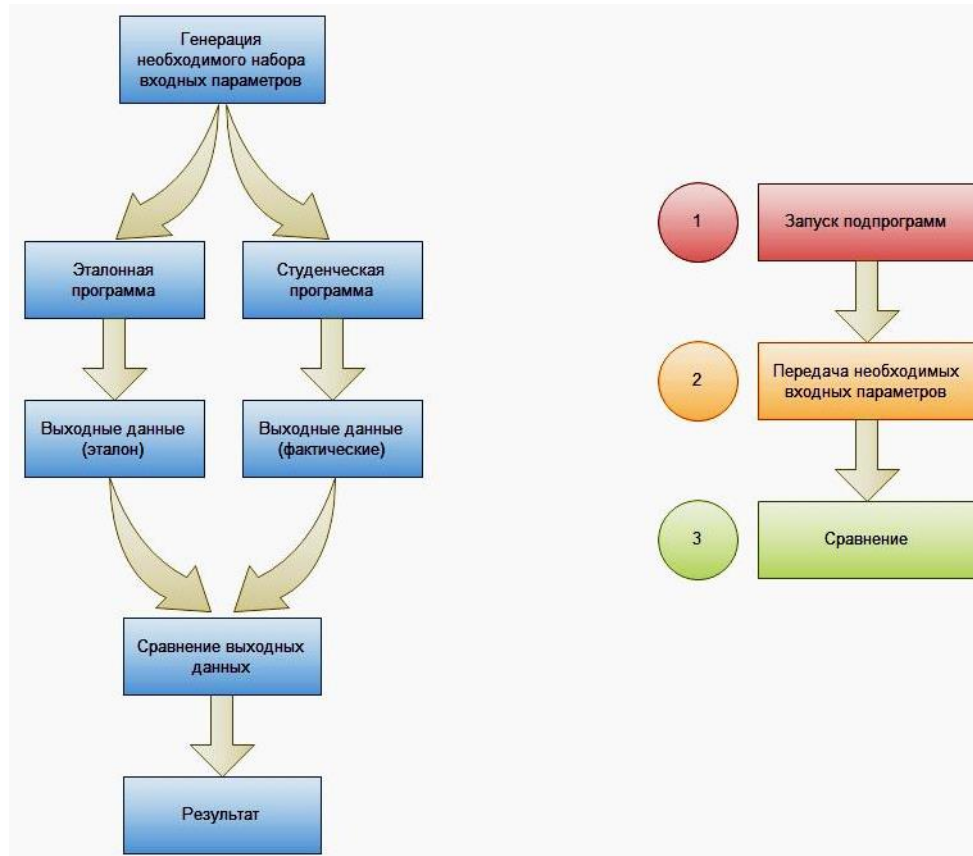


Рис. 1. Алгоритм функционирования модуля динамического тестирования

В процессе функционирования разработанного алгоритма выяснилось, что эталонные программы могут на выходе получать не корректные данные, а именно:

- «#INF00» – бесконечность;
- «-#INF00» – минус бесконечность;
- «IND00» – неопределённость;
- «IND00» – отрицательная неопределённость.

Таким образом, в алгоритме реализована возможность перехвата такого рода результатов и генерация иного набора входных параметров для успешной итерации тестирования.

К особенностям функционирования разработанного алгоритма также можно отнести исключительные ситуации, когда входной набор данных даже на эталонной программе не даёт должного результата, в таком случае алгоритм предусматривает повторную генерацию входных наборов данных из другого диапазона значений. Поэтому минимальное количество необходимых корректных результатов должно быть не менее пяти. Следовательно, фактическое количество проверок и генераций входных данных может быть больше, соответственно это позволяет с высокой вероятностью определить правильность выполнения поставленной задачи.

Итоговой целью разрабатываемой тестирующей системы является проверка знаний и умений учащихся, а так же оценка степени их соответствия компетенциям ФГОС.

На рис. 2 представлена методология графического структурного анализа, описывающая внешние по отношению к системе сущности и потоки данных.

Диаграмма потоков данных (data flow diagram, DFD) является одним из самых мощных инструментов структурного анализа и проектирования. Представленная диаграмма потоков данных позволяет наглядно отобразить протекающие в системе процессы.

На диаграмме имеется два компонента отображающие накопители данных:

— *D1 – хранилище исходных кодов и исполняемых файлов эталонных программ;*

— *D2 – внешнее удалённое хранилище данных, предназначенное, в частности, для сохранения результатов и рекомендаций по протестированным программам.*

На диаграмме имеется одна внешняя сущность – «Студент», которая передает в модуль исходный код реализованной им программы.

Также на диаграмме представлены три процесса:

— «Генерация входных параметров»;

— «Запуск эталонной и студенческой программ»;

— «Сравнение выходных данных».

Стрелками на диаграмме отображены направления движения потоков данных.

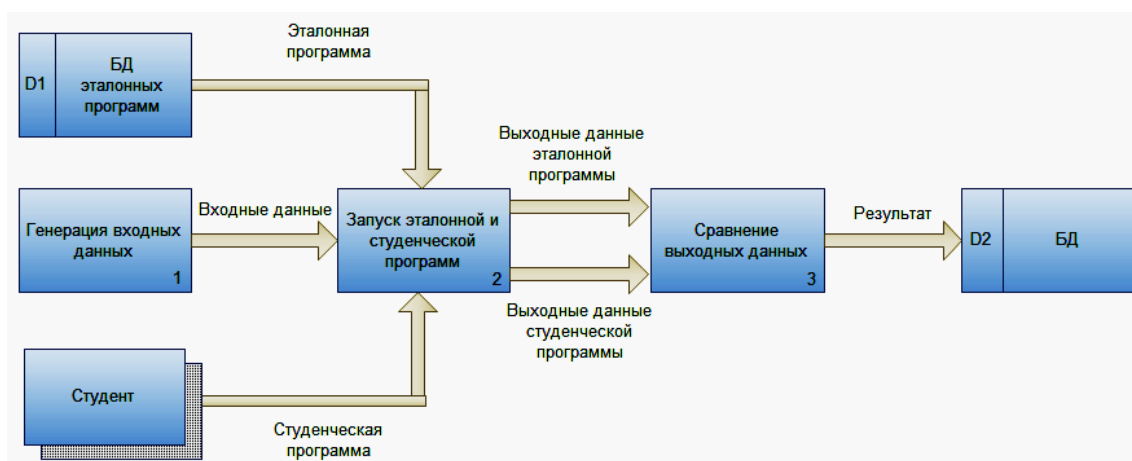


Рис. 2. Диаграмма потоков данных DFD

Разработанный модуль динамического тестирования учебных программ является отличительной особенностью предлагаемой автоматизированной системы в сравнении с аналогичными системами [5-7 и др.], поскольку имеет расширенную функциональность за счёт подсчёта статистики использования аппаратных ресурсов целевой платформы в процессе выполнения учебных программ, таких как: процессорное время и оперативная память, ресурсы, которые необходимы для запуска и корректного выполнения программ. В настоящее время это очень актуально: такого рода ограничения часто предусмотрены при решении олимпиадных заданий; динамичное развитие мобильных платформ требует оптимального использования аппаратных ресурсов; дополнительные ограничения способствуют формированию у обучающихся разработке не тривиальных алгоритмов при решении задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виштак О.В. Дидактические основы построения информационных комплексов для самостоятельной учебной деятельности студентов, изучающих информатику: дис.... д-ра пед. наук / О.В. Виштак. М., 2005.
2. Алексеев Ю.Е. Автоматизация тестирования студенческих программ / Ю.Е. Алексеев, А.В. Куров // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. вып. 6. URL: <http://engjournal.ru/catalog/it/hidden/768.html>.
3. Михеев И.В. Критерии оценки качества компьютерных обучающих систем / И.В. Михеев // Инновационные информационные технологии 2014: сб. тр. III Междунар. науч.-практ. конф. Прага: HSE, 2014. С. 373-376.
4. Михеев И.В. Применение компьютерных обучающих систем в учебном процессе высшей школы / И.В. Михеев // SWorld: сб. тр. по материалам науч.-практ. интернет-конф. «Современные направления теоретических и прикладных исследований '2013». Т. 4. Одесса: КУПРИЕНКО С.В., 2014. С. 65-68.
5. Веретенников М.В. Автоматизация проверки знаний и навыков студентов в области прикладной математики и информатики: дис. ... канд. техн. наук / М.В. Веретенников. Томск, 2004.
6. Угаров В.В. Компьютерные модели и программные комплексы в проектно-ориентированном

обучении: канд. техн. наук / В.В. Угаров. Ульяновск, 2005.

7. Вергазов Р.И. Система компьютерного тестирования знаний: дис. ... канд. техн. наук / Р.И. Вергазов. Пенза, 2006.

8. Сеницын С. Верификация программного обеспечения / С. Сеницын, Н. Налютин. СПб.: Бином. Лаборатория знаний, 2008. 368 с.

9. Виштак О.В. Комплексный подход создания электронных образовательных ресурсов / О.В. Виштак, Д.В. Кондратов // *Universum: Психология и образование*. 2014. № 2 (3). С. 7.

10. Виштак О.В. Направления программной реализации электронных образовательных ресурсов / О.В. Виштак // *Sword: сб. науч. тр.* 2013. Т. 5. № 2. С. 36-39.

Михеев Иван Васильевич –
аспирант Поволжского института управления
имени П.А. Столыпина

Ivan V. Mikheyev –
Postgraduate,
Institute of Management Volga P.A. Stolypin

Кондратов Дмитрий Вячеславович –
доктор физико-математических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Прикладная информатика
и информационные технологии в управлении»
Поволжского института управления
имени П.А. Столыпина

Dmitri V. Kondratov –
Dr Sc,
Department of Applied Informatics and Information
Technology in Management
Stolypin Volga Region Institute

Виштак Ольга Васильевна –
доктор педагогических наук, доцент,
заведующая кафедрой «Информационные
системы и технологии» Балаковского института
техники технологии и управления (филиал)
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Olga V. Vishtak –
Dr. Sc.,
Department of Information Systems
and Technologies
Balakovo Institute of Engineering Technology
and Management (branch)
of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 25.12.14, принята к опубликованию 11.05.15

УДК 519.713.2, 512.573

И.Е. Ульзутуев, А.А. Максимов

О СВОЙСТВАХ РЕШЁТОК ПОДАВТОМАТОВ НЕЧЁТКИХ ПОЛУАВТОМАТОВ И ИХ ДЕТЕРМИНИЗАТОРОВ

Рассмотрены связи между некоторыми универсально – алгебраическими конструкциями нечётких полуавтоматов и универсально – алгебраическими конструкциями их детерминизаторов. Показаны связи между решётками подавтоматов нечётких полуавтоматов и соответствующими решётками их детерминизаторов. Доказано, что решётка подавтоматов произвольного нечёткого полуавтомата изоморфно вкладывается в решётку подавтоматов его детерминизатора. Рассмотрены некоторые вопросы сильной связности нечётких полуавтоматов и их детерминизаторов. Показано, что детерминизаторы сильно связанных нечётких полуавтоматов могут не являться сильно связными полуавтоматами.

Нечёткий полуавтомат, детерминизатор, решётка подавтоматов, подрешётка

I.E. Ulzutuev, A.A. Maximov

THE PROPERTIES OF SUBAUTOMATA LATTICES OF FUZZY SEMIAUTOMATA AND THEIR DETERMINIZATORS

Relations between the algebraic properties of fuzzy semiautomata and algebraic properties of their determinizers are considered in this article. The relations between

subautomata lattices of fuzzy semiautomata and subautomata lattices of the appropriate determinizators are shown. It is proved that subautomata lattice of the arbitrary fuzzy semiautomaton is isomorphically embedded in the subautomata lattice of its determinizator. Some issues of the fuzzy semiautomata strong connectivity are considered. It is also shown that the determinizator of the strongly connected fuzzy semiautomata may not be strongly connected semiautomata.

Fuzzy semiautomaton, determinizator, subautomata lattice, sublattice

В последние десятилетия наблюдается возрастание интереса к различным аспектам проблемы интеллектуального управления [1, 2]. Одно из основных направлений, связанных с решением задач такого рода, состоит в использовании аппарата нечётких систем: нечётких множеств, нечёткой логики, нечёткого моделирования и т.п. Применение данных подходов приводит к построению нечётких систем управления различных классов, позволяющих решать задачи управления в ситуациях, когда традиционные методы неэффективны или даже вообще неприменимы из-за отсутствия достаточно точного знания об объекте управления [3]. С начала 1990-х годов наблюдается интенсивное развитие нечётких методов в рамках целого ряда прикладных областей, как правило, связанных с техникой [3], таких как: управление печами, холодной прокаткой, водяными насосами, а также распознаванием образов и речи [4]. Нечёткое моделирование и управление применяются также и в медицинских целях [3, 5].

В 1965 году Лотфри Заде опубликовал основополагающую работу «Fuzzy Sets» в журнале «Information and Control», где впервые ввёл понятие нечёткого множества [6]. В 1969 году Ви и Фу предложили конструкцию нечёткой автоматной модели, являющейся обобщением конструкции детерминированных автоматов [7]. Основная идея заключалась в том, что в отличие от детерминированных автоматов в нечётких автоматах переходы между различными состояниями определяются не однозначно, а имеют некоторую оценку из отрезка $[0,1]$.

Таким образом, нечёткие автоматы и полуавтоматы являются математическими моделями нечётких дискретных систем, имеющих определённые наборы состояний, правила переходов между которыми определены неоднозначно.

Удобным способом для описания функционального поведения нечётких автоматов / полуавтоматов являются методы универсальной алгебры [8], стандартные алгоритмы которой успешно применяются для решения задач математического и компьютерного моделирования реальных систем и процессов.

Ранее для нечетких автоматов/полуавтоматов Максимовым А.А. были введены аналоги универсально-алгебраических конструкций [9], а также была показана возможность применения этих конструкций при решении задач минимизации сложных информационных систем [10, 11].

Однако при решении практических задач было бы удобнее иметь дело с детерминированными автоматами/полуавтоматами, которые функционально полностью отражали бы поведение соответствующих им нечётких автоматов/полуавтоматов и в то же время допускали бы более простую реализацию. Такие детерминированные автоматы/полуавтоматы существуют и их называют детерминизаторами [12] нечётких автоматов/полуавтоматов. Тем не менее до сих пор в полной мере не изучены связи между универсально-алгебраическими конструкциями нечетких полуавтоматов / автоматов и универсально-алгебраическими конструкциями их детерминизаторов, также в полной мере не изучены связи между их свойствами.

В данной статье рассматриваются некоторые взаимосвязи между некоторыми универсально-алгебраическими конструкциями нечётких полуавтоматов и аналогичными универсально-алгебраическими конструкциями их детерминизаторов.

При этом рассматриваются исключительно нечёткие полуавтоматы (т.е. нечёткие автоматы без функции выхода). Поэтому далее в тексте данной работы для удобства записи, подразумевая полуавтомат, будем говорить просто автомат.

Для описания результатов работы приведём необходимые определения.

Определение 1. Пусть S – некоторое непустое множество, состоящее из n элементов. Нечётким подмножеством $M(S)$ множества S называется совокупность

$$\mu(S) = (\mu(s_1) \ \mu(s_2) \ \dots \ \mu(s_n)), \ \mu_i \in [0,1], \ 1 \leq i \leq n.$$

Таким образом, число $\mu(s)$ интерпретируется как степень уверенности в суждении о принадлежности элемента $s \in S$ нечёткому множеству $M(S)$.

Определение 2. Нечёткой матрицей $A = (a_{ij})$ размерности $n \times m$ называется матрица с элементами из отрезка $[0, 1]$.

Умножение нечётких матриц определяется формулой: $(AB)_{ik} = \max_j \min(A_{ij}, B_{jk})$. Таким образом, для вычисления суммы элементов нечётких матриц используется операция взятия максимума, а для вычисления произведения их элементов – операция взятия минимума.

Определение 3. Нечётким автоматом называется тройка $A = (S, X, \delta)$, где S и X – непустые конечные множества (множество состояний и множество входных сигналов), а $\delta: S \times X \rightarrow \mu(S)$ – нечёткая функция переходов.

Равенство $\delta(s_1, x)(s_2) = l$ истолковывается следующим образом: нечёткий автомат A из состояния s_1 под действием входного сигнала x может перейти в состояние s_2 со степенью уверенности $l \in [0, 1]$ [8].

Каждому входному сигналу $x \in X$ нечёткого автомата A можно поставить в соответствие нечёткую матрицу перехода $M(x)$ размерности $n \times n$, $n = |S|$.

Элемент $(M(x))_{ij} = l$, $l \in [0, 1]$, если под действием входного сигнала x нечёткий автомат A может перейти из состояния s_i в состояние s_j со степенью уверенности l .

Графически нечёткий автомат изображается в виде нечёткого графа переходов $G(A)$, т.е. ориентированного графа, дуги которого имеют вес из отрезка $[0, 1]$.

Состояния автомата изображаются вершинами графа $G(A)$. Если состояние s_1 под действием входного сигнала x переходит в состояние s_2 со степенью уверенности l , то в графе $G(A)$ существует дуга (s_1, s_2) с весом l , помеченная символом x .

Определение 4. Нечёткий автомат $A = (S, X, \delta)$ называется автономным, если множество его входных сигналов состоит из одного элемента, то есть $X = \{x\}$.

Определение 5. Автономной компонентой нечёткого автомата $A = (S, X, \delta)$ называется нечёткий автомат $A_k = (S, \{x_k\}, \delta_k)$.

Очевидно, что любой нечёткий автомат можно представить в виде объединения его автономных компонент: $A = \bigcup A_i$.

Графически нечёткий автомат A также можно задать и набором графов, представляющих его автономные компоненты A_i .

Определение 6. Замыканием $[E]_{\Sigma}$ множества E относительно сигнатуры Σ называется множество всех элементов (включая сами элементы множества E), которые можно получить, применяя операции из сигнатуры Σ .

Определение 7. Пусть $A = (S, X, \delta)$ – нечёткий автомат, $n = |S|$ – количество состояний автомата A , E – множество из n единичных нечётких векторов размерности n , $M(X)$ – множество нечётких матриц перехода нечёткого автомата A . Детерминизатором нечёткого автомата $A = (S, X, \delta)$ называется детерминированный автомат $D(A) = (M(S), X, \Delta)$, где $M(S) = [E]_{M(X)}$, а Δ – функция переходов детерминизатора $D(A): \Delta: M(S) \rightarrow M(S)$, $\Delta(\mu) = \mu \cdot M(x)$, $\mu \in M(S)$, $M(x) \in M(X)$.

Единичные нечёткие вектора из множества E называются порождающими состояниями детерминизатора $D(A)$. Эти «координатные» векторы можно отождествить с состояниями нечёткого автомата A .

Пусть $M(S) = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N\}$, $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$. Тогда функцию переходов Δ детерминизатора $D(A)$ удобно представить в виде таблицы следующего вида:

Δ	x_1	x_2	\dots	x_m
μ_1	$\Delta(\mu_1, x_1)$	$\Delta(\mu_1, x_2)$	\dots	$\Delta(\mu_1, x_m)$
μ_2	$\Delta(\mu_2, x_1)$	$\Delta(\mu_2, x_2)$	\dots	$\Delta(\mu_2, x_m)$
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
μ_N	$\Delta(\mu_N, x_1)$	$\Delta(\mu_N, x_2)$	\dots	$\Delta(\mu_N, x_m)$

Графически детерминизатор $D(A)$ изображается в виде ориентированного графа переходов $G(D(A))$, вершины которого помечены нечёткими векторами – состояниями из множества $M(S)$.

Пример 1. Рассмотрим автономный нечёткий автомат $A = (\{s_1, s_2\}, \{x_1\}, \delta)$, функция переходов δ которого задана следующей нечёткой матрицей переходов $M(x_1) = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.6 \\ 0.7 & 0.4 \end{pmatrix}$, и построим его детерминизатор $D(A)$.

Порождающими состояниями $D(A)$ являются нечёткие вектора $\mu_1 = (1 \ 0)$ и $\mu_2 = (0 \ 1)$. На их основе построим все остальные состояния детерминизатора $D(A)$:

$$\begin{aligned} \mu_1 \cdot M(x_1) &= (1 \ 0) \begin{pmatrix} 0.5 & 0.6 \\ 0.7 & 0.4 \end{pmatrix} = (0.5 \ 0.6) = \mu_3 \\ \mu_2 \cdot M(x_1) &= (0 \ 1) \begin{pmatrix} 0.5 & 0.6 \\ 0.7 & 0.4 \end{pmatrix} = (0.7 \ 0.4) = \mu_4 \\ \mu_3 \cdot M(x_1) &= (0.5 \ 0.6) \begin{pmatrix} 0.5 & 0.6 \\ 0.7 & 0.4 \end{pmatrix} = (0.6 \ 0.5) = \mu_5 \\ \mu_4 \cdot M(x_1) &= (0.7 \ 0.4) \begin{pmatrix} 0.5 & 0.6 \\ 0.7 & 0.4 \end{pmatrix} = (0.5 \ 0.6) = \mu_3 \\ \mu_5 \cdot M(x_1) &= (0.6 \ 0.5) \begin{pmatrix} 0.5 & 0.6 \\ 0.7 & 0.4 \end{pmatrix} = (0.5 \ 0.6) = \mu_3 \end{aligned}$$

Таблица переходов детерминизатора $D(A)$:

Δ	x_1
$\mu_1(1 \ 0)$	$\mu_3(0.5 \ 0.6)$
$\mu_2(0 \ 1)$	$\mu_4(0.7 \ 0.4)$
$\mu_3(0.5 \ 0.6)$	$\mu_5(0.6 \ 0.5)$
$\mu_4(0.7 \ 0.4)$	$\mu_3(0.5 \ 0.6)$
$\mu_5(0.6 \ 0.5)$	$\mu_3(0.5 \ 0.6)$

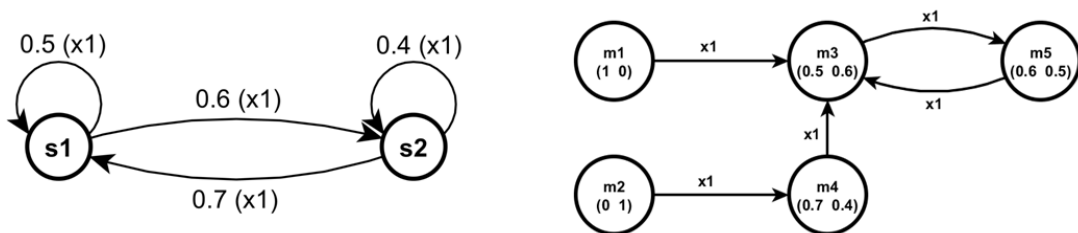


Рис. 1. Графы переходов нечёткого автомата (слева) и его детерминизатора (справа)

Пример 2. Рассмотрим нечёткий автомат $A = (S, X, \delta)$, где $S = \{s_1, s_2\}$, $X = \{x_1, x_2\}$, а функция переходов δ задана следующими нечёткими матрицами переходов: $M(x_1) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0.4 & 0.8 \end{pmatrix}$,

$$M(x_2) = \begin{pmatrix} 0.3 & 0.7 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Его автономными компонентами, очевидно, являются следующие нечёткие автоматы: $A_1 = (S, \{x_1\}, \delta)$, $A_2 = (S, \{x_2\}, \delta)$, нечёткие графы переходов которых изображены на следующих рисунках:

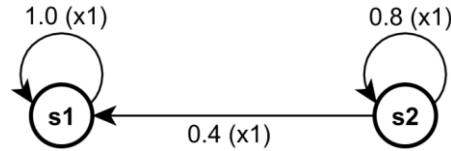


Рис. 2. Нечёткий граф переходов автономной компоненты A_1

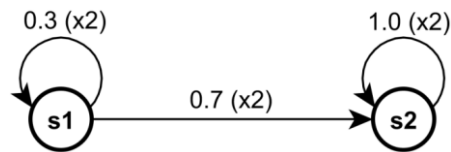


Рис. 3. Нечёткий граф переходов автономной компоненты A_2

Порождающими состояниями $D(A)$ являются нечёткие вектора $\mu_1 = (1 \ 0)$ и $\mu_2 = (0 \ 1)$. На их основе построим все остальные состояния детерминизатора $D(A)$:

$$\mu_1 \cdot M(x_1) = (1 \ 0) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0.4 & 0.8 \end{pmatrix} = (1 \ 0) = \mu_1$$

$$\mu_2 \cdot M(x_1) = (0 \ 1) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0.4 & 0.8 \end{pmatrix} = (0.4 \ 0.8) = \mu_3$$

$$\mu_3 \cdot M(x_1) = (0.4 \ 0.8) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0.4 & 0.8 \end{pmatrix} = (0.4 \ 0.8) = \mu_3$$

$$\mu_1 \cdot M(x_2) = (1 \ 0) \begin{pmatrix} 0.3 & 0.7 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = (0.3 \ 0.7) = \mu_4$$

$$\mu_2 \cdot M(x_2) = (0 \ 1) \begin{pmatrix} 0.3 & 0.7 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = (0 \ 1) = \mu_2$$

$$\mu_4 \cdot M(x_2) = (0.3 \ 0.7) \begin{pmatrix} 0.3 & 0.7 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = (0.3 \ 0.7) = \mu_4$$

$$\mu_3 \cdot M(x_2) = (0.4 \ 0.8) \begin{pmatrix} 0.3 & 0.7 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = (0.3 \ 0.8) = \mu_5$$

$$\mu_4 \cdot M(x_1) = (0.3 \ 0.7) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0.4 & 0.8 \end{pmatrix} = (0.4 \ 0.7) = \mu_6$$

$$\mu_5 \cdot M(x_1) = (0.3 \ 0.8) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0.4 & 0.8 \end{pmatrix} = (0.4 \ 0.8) = \mu_3$$

$$\mu_5 \cdot M(x_2) = (0.3 \ 0.8) \begin{pmatrix} 0.3 & 0.7 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = (0.3 \ 0.8) = \mu_5$$

$$\mu_6 \cdot M(x_1) = (0.4 \ 0.7) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0.4 & 0.8 \end{pmatrix} = (0.4 \ 0.7) = \mu_6$$

$$\mu_6 \cdot M(x_2) = (0.4 \ 0.7) \begin{pmatrix} 0.3 & 0.7 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = (0.3 \ 0.7) = \mu_4$$

Таблица переходов детерминизатора $D(A)$:

Δ	x_1	x_2
$\mu_1(1 \ 0)$	$\mu_1(1 \ 0)$	$\mu_4(0.3 \ 0.7)$
$\mu_2(0 \ 1)$	$\mu_3(0.4 \ 0.8)$	$\mu_2(0 \ 1)$
$\mu_3(0.4 \ 0.8)$	$\mu_3(0.4 \ 0.8)$	$\mu_5(0.3 \ 0.8)$
$\mu_4(0.3 \ 0.7)$	$\mu_6(0.4 \ 0.7)$	$\mu_4(0.3 \ 0.7)$
$\mu_5(0.3 \ 0.8)$	$\mu_3(0.4 \ 0.8)$	$\mu_5(0.3 \ 0.8)$
$\mu_6(0.4 \ 0.7)$	$\mu_6(0.4 \ 0.7)$	$\mu_4(0.3 \ 0.7)$

Граф переходов детерминизатора $D(A)$:

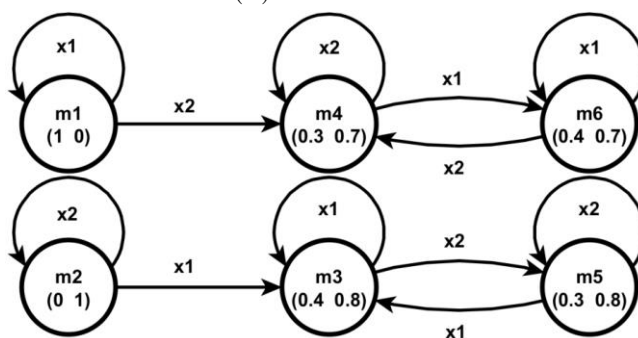


Рис. 4. Граф переходов детерминизатора $D(A)$

Из примера 2 также легко видеть, что детерминизаторы автономных компонент нечёткого автомата A могут не совпадать с автономными компонентами его детерминизатора $D(A)$.

Все утверждения и теоремы, справедливые для нечётких автоматов, справедливы и для их детерминизаторов, поскольку детерминированный автомат является частным случаем нечёткого автомата.

Определение 8. Подмножество S^* множества S называется устойчивым в нечётком автомате $A = (S, X, \delta)$, если $(\forall s^* \in S^*)(\forall x \in X)(\text{supp}(\delta(s^*, x)) \subseteq S^*)$, где supp – носитель нечёткого вектора, $\text{supp } \mu = \{s \in S \mid \mu(s) > 0\}$.

Определение 9. Нечёткий автомат $A^* = (S^*, X, \delta^*)$ называется подавтоматом нечёткого автомата $A = (S, X, \delta)$, если S^* – устойчивое подмножество множества состояний нечёткого автомата A , а $\delta^* = \delta|_{S^* \times X}$ – сужение функции переходов δ на множество S^* .

Множество всех подавтоматов нечёткого автомата A вместе с пустым автоматом обозначают символом $Sub A$.

Множество всех подавтоматов детерминизатора $D(A) = (M(S), X, \Delta)$ нечёткого автомата $A = (S, X, \delta)$ обозначим как $Sub D(A)$.

Для каждого подавтомата $A^* \in Sub A$ определён отдельный детерминизатор $D(A^*)$. Множество всех таких детерминизаторов обозначим символом $DSub A$.

Ранее в [9] была доказана справедливость следующей теоремы о структуре множества подавтоматов нечётких автоматов:

Теорема 1. Совокупность $Sub A$ всех подавтоматов нечёткого автомата A вместе с пустым подавтоматом образует решётку.

Из [8] известно, что множество $P(S)$ всех подмножеств некоторого множества S образует дистрибутивную решётку относительно операций объединения и пересечения множеств.

Очевидно, что решётка $Sub A$ является подрешёткой решётки $P(S)$. Следовательно, множество $Sub A$ всех подавтоматов нечёткого автомата A является дистрибутивной решёткой.

Рассмотрим подробнее, как связаны между собой решётки подавтоматов нечётких автоматов и соответствующие решётки их детерминизаторов. Для доказательства основных результатов для начала докажем ряд вспомогательных утверждений.

Теорема 2. Пусть $A = (S, X, \delta)$ – нечёткий автомат и $A^* = (S^*, X, \delta^*)$ – некоторый его ненулевой подавтомат. Тогда детерминизатор $D(A^*) = (M(S^*), X, \Delta^*)$ является подавтоматом детерминизатора $D(A) = (M(S), X, \Delta)$.

Доказательство. Обозначим множество порождающих состояний детерминизатора $D(A) = (M(S), X, \Delta)$ как E , множество порождающих состояний детерминизатора $D(A^*) = (M(S^*), X, \Delta^*)$ как E^* . По построению $E^* \subseteq E$. Очевидно, что $[E^*]_{M(X)} = M(S^*)$, $[E]_{M(X)} = M(S)$ и $[E^*]_{M(X)} \subseteq [E]_{M(X)} \Rightarrow M(S^*) \subseteq M(S)$. Следовательно, множество $M(S^*)$ устойчиво в детерминизаторе $D(A) = (M(S), X, \Delta)$ и детерминизатор $D(A^*)$ является подавтоматом детерминизатора $D(A)$.

Следствие 1 из теоремы 2. Множество $DSub A$ детерминизаторов нечётких подавтоматов нечёткого автомата $A = (S, X, \delta)$ является дистрибутивной решёткой, причём эта решётка изоморфна решётке $Sub A$ подавтоматов нечёткого автомата $A = (S, X, \delta)$, т.е. $Sub A \cong DSub A$.

Доказательство. Рассмотрим произвольные нечёткие автоматы $A_1 = (S_1, X, \delta)$ и $A_2 = (S_2, X, \delta)$. Определим отображение $\Psi: Sub A \rightarrow DSub A$ следующим образом: $\Psi(A) = D(A)$, $A \in Sub A$, $D(A) \in DSub A$. По построению $DSub A$ очевидно, что Ψ является биекцией, т.к. из $\Psi(A_1) \neq \Psi(A_2) \Rightarrow A_1 \neq A_2$ и $\Psi(Sub A) = DSub A$. Кроме того, из теоремы 3 следует, что порядок в множестве $DSub A$ совпадает с порядком в дистрибутивной решётке $Sub A$. Следовательно, множество $DSub A$ является дистрибутивной решёткой и $Sub A \cong DSub A$.

Следствие 2 из теоремы 2. Детерминированный автомат $A = (S, X, \delta)$ изоморфен своему детерминизатору $D(A) = (M(S), X, \Delta)$, т.е. $A \cong D(A)$, если A – детерминированный автомат.

Рассмотрим теперь детерминизаторы нечётких автоматов с решётками подавтоматов наиболее простого вида.

Определение 10. Нечёткий автомат $A = (S, X, \delta)$ называется примитивным, если решётка его подавтоматов содержит только тривиальные подавтоматы, т.е. $Sub A = \{\emptyset, A\}$.

Определение 11. Пусть $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ – множество входных сигналов произвольного нечёткого автомата (его входной алфавит), X^* – множество всевозможных конечных последовательностей входных сигналов вида $x_{i_1}x_{i_2}\dots x_{i_k}$ (слов над этим алфавитом). Пустое слово e также принадлежит алфавиту X^* : $e \in X^*$.

Пусть теперь $A = (S, X, \delta)$ – нечёткий автомат, тогда для $\forall s \in S$, $\forall p, q \in X^*$ выполняется: $\delta(s, e)(s) = 1$, $\delta(s, pq) = \delta(\delta(s, p), q)$.

Определение 12. Пусть $A = (S, X, \delta)$ – нечёткий автомат, $s_1, s_2 \in S$, $p \in X^*$. Говорят, что состояние s_2 достижимо из состояния s_1 в нечётком автомате A , если существует входное слово p такое, что $\delta(s_1, p)(s_2) = l$, $l \in (0, 1]$.

Множество всех состояний, достижимых из состояния $s \in S$, включая само состояние s (т.к. $\delta(s, e)(s) = 1$) обозначим как $S(s)$.

Определение 13. Ненулевой нечёткий автомат $A = (S, X, \delta)$ называется сильно связным, если любые два его состояния достижимы друг из друга.

Очевидно, что в сильно связном нечётком автомате $S = S(s)$ для $\forall s \in S$.

Теорема 3. Нечёткий автомат $A = (S, X, \delta)$ является примитивным тогда и только тогда, когда он является сильно связным.

Доказательство. Пусть нечёткий автомат $A = (S, X, \delta)$ является примитивным, $s_1 \in S$ и $s_2 \in S$ – его произвольные состояния. Вследствие примитивности $S(s_1) = S \Rightarrow s_2 \in S(s_1)$ и $S(s_2) = S \Rightarrow s_1 \in S(s_2)$. Это означает, что состояния s_1 и s_2 взаимно достижимы друг из друга. Следовательно, в силу произвольности выбора состояний s_1 и s_2 нечёткий автомат A сильно связан.

Пусть теперь нечёткий автомат $A = (S, X, \delta)$ сильно связан, $A^* = (S^*, X, \delta^*)$ – некоторый его ненулевой подавтомат и $s \in S^*$. Очевидно, что $S(s) \subseteq S^*$ в силу устойчивости подмножества S^* в автомате A^* . С другой стороны, по причине сильной связности нечёткого автомата A : $S(s) = S$. Следовательно, $S^* = S$ и $A^* = A$. Значит, нечёткий автомат A примитивен.

Теорема 4. Детерминизатор $D(A) = (M(S), X, \Delta)$ сильно связного нечёткого автомата $A = (S, X, \delta)$ может не являться сильно связным автоматом.

Доказательство. Пусть хотя бы одна матрица переходов нечёткого автомата A имеет следующий вид:

$$M(x) = \begin{pmatrix} m_{11} & \dots & m_{1j} & \dots & m_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_{i1} & \dots & m_{ij} & \dots & m_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_{n1} & \dots & m_{nj} & \dots & m_{nn} \end{pmatrix}, x \in X, 0 < m_{ij} < 1, 1 \leq i, j \leq n$$

Очевидно, что нечёткий автомат A с такой матрицей переходов является сильно связным.

Обозначим множество порождающих состояний детерминизатора $D(A) = (M(S), X, \Delta)$ как $E = \{e_1, \dots, e_n\}$.

Тогда детерминизатор $D(A)$, помимо своих порождающих состояний e_1, \dots, e_n , будет содержать также и состояния $\{\mu_i \mid \mu_i = (m_{i1} \dots m_{ij} \dots m_{in}), 1 \leq i \leq n\}$ и, возможно, ещё ряд нетривиальных состояний $\mu_{n+1}, \dots, \mu_{n+r}$, полученных по формуле $\mu_i \cdot M(x)$.

Для того, чтобы хотя бы из одного из состояний μ_1, \dots, μ_{n+r} можно было вернуться в хотя бы одно из порождающих состояний детерминизатора e_1, \dots, e_n , необходимо выполнение хотя бы одного из следующих условий: $\mu_j \cdot M(x_k) = e_i, \mu_j \in \{\mu_1, \dots, \mu_{n+r}\}, x_k \in X, e_i \in E$.

Очевидно, что если ни один из нечётких векторов μ_j не содержит ни одной единицы, то выполнение данных условий невозможно, и вернуться из состояний μ_1, \dots, μ_{n+r} в состояния e_1, \dots, e_n не представляется возможным.

Следовательно, детерминизатор сильно связного нечёткого автомата может не являться сильно связным автоматом.

Следствие 1 из теоремы 4. Детерминизатор $D(A) = (M(S), X, \Delta)$ примитивного нечёткого автомата $A = (S, X, \delta)$ может не являться примитивным автоматом.

Нечёткие автоматы из примеров 1 и 2 являются сильно связными (следовательно, примитивными), а их детерминизаторы – нет.

Теорема 5. Мощность множества $Sub D(A)$ больше или равна мощности множества $Sub A$, т.е. $|Sub A| \leq |Sub D(A)|$.

Доказательство. В тривиальном случае, когда нечёткий автомат $A = (S, X, \delta)$ является детерминированным, $A \cong D(A)$ и $|Sub A| = |Sub D(A)|$.

Из теоремы 2 также очевидно, что равенство $|Sub A| > |Sub D(A)|$ никогда не может выполняться.

Из теоремы 4 следует, что неравенство $|Sub A| < |Sub D(A)|$ может быть справедливо.

Следовательно, в общем случае $|Sub A| \leq |Sub D(A)|$.

Следствие 1 из теоремы 5. Решётка $DSub A$ детерминизаторов подавтоматов нечёткого автомата $A=(S, X, \delta)$ является подрешёткой решётки подавтоматов детерминизатора $D(A)=(M(S), X, \Delta)$ нечёткого автомата $A=(S, X, \delta)$, т.е. $DSub A \subseteq Sub D(A)$.

Доказательство. Поскольку любой нечёткий автомат $A^* \in Sub A$ является подавтоматом нечёткого автомата $A=(S, X, \delta)$, то по теореме 3 детерминизатор $D(A^*) \in DSub A$ является подавтоматом детерминизатора $D(A)=(M(S), X, \Delta)$ и, значит, одновременно $D(A^*) \in Sub D(A)$. Из теоремы 4 $|Sub A| \leq |DSub A|$. Следовательно, $DSub A \subseteq Sub D(A)$.

Следствие 2 из теоремы 5. Решётка $Sub A$ подавтоматов нечёткого автомата $A=(S, X, \delta)$ изоморфна некоторой подрешётке решётки подавтоматов детерминизатора $D(A)=(M(S), X, \Delta)$ этого нечёткого автомата.

Доказательство. По следствию 1 из теоремы 3: $Sub A \cong DSub A$. По следствию 1 из теоремы 4: $DSub A \subseteq Sub D(A)$. Значит, $Sub A \cong DSub A \subseteq Sub D(A)$.

Заключение. Таким образом, мы рассмотрели связи между решётками подавтоматов нечётких полуавтоматов и соответствующими решётками их детерминизаторов с универсально-алгебраической точки зрения. Доказано, что решётка подавтоматов произвольного нечёткого полуавтомата является подрешёткой решётки подавтоматов его детерминизатора. Показано, что детерминизатор сильно связного нечёткого автомата может не являться сильно связным автоматом.

Тем не менее остаётся открытым вопрос о связях между решётками конгруэнций нечётких полуавтоматов и решётками конгруэнций их детерминизаторов.

Интерес также представляют вопросы, связанные с гомоморфизмами, и в частности, с изоморфизмами детерминизаторов нечётких полуавтоматов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сластихина М.Д. О подходе к проектированию функционально избыточных систем, заданных автоматами специального класса / М.Д. Сластихина, А.А. Сытник, Т.Э. Шульга // Вестник СГТУ 2013. № 4 (73). С. 167-175.
2. Сытник А.А. Об алгоритмической неразрешимости задач математического моделирования функционально избыточных дискретных систем / А.А. Сытник, Т.Э. Шульга // Вестник СГТУ. 2011. № 4 (60). С. 213-218.
3. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление: пер. с англ. / А. Пегат. 2-е изд. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 798 с.
4. Тэрано Т., Асаи К., Сугэно М. Прикладные нечеткие системы / Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. М.: Мир, 1993. 368 с.
5. Максимов А.А. Индексы и периоды нечетких матриц и их возможное применение в области биомедицины / А.А. Максимов, С.В. Папшев // Теоретические и прикладные вопросы современных информационных технологий: материалы XI Всерос. науч.-техн. конф. Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2012. С. 213-221.
6. Zadeh L.A. Fuzzy Sets / L.A. Zadeh // Inform. and Control. 1965 Vol. 8, pp. 338-353.
7. Wee W.G. Formulation of Fuzzy Automata and its Applications as a Model of Learning Systems / W.G. Wee, K.S. Fu // I.E.E.E. Trans. Syst. Science and Cybernetics. 1969. Vol. SSC-5. P. 215-223
8. Салий В.Н. Универсальная алгебра и автоматы / В.Н. Салий. Саратов: СГУ, 1988. 72 с.
9. Максимов А.А. Методы анализа и синтеза математических моделей нечётких дискретных систем: дис. ... канд. физ.-мат. наук / А.А. Максимов. Саратов, 2008. 130 с.
10. Максимов А.А. Исследование сложных информационных систем с использованием универсально-алгебраических конструкций нечетких автоматов / А.А. Максимов // Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. 2006. №14 (3). С. 126-128
11. Максимов А.А. Минимизация сложных информационных систем с использованием универсально-алгебраических конструкций нечетких автоматов / А.А. Максимов // Теоретические и прикладные вопросы современных информационных технологий: материалы Всерос. науч.-техн. конф. Улан-Удэ, 2007. С. 187-191.
12. Салий В.Н. Нечёткие дискретные системы: нелинейный подход // Известия Саратов. гос. ун-та, 2003. Т. 3. Вып. 2. С. 159-168.

Ульзутуев Иван Евгеньевич – аспирант кафедры «Прикладная информатика и программная инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ivan E. Ulzutuev – Postgraduate
Department of Applied Computer Science and Software Engineering,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Максимов Алексей Алексеевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Прикладная информатика и программная инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksey A. Maximov – Ph.D., Associate Professor
Department of Applied Computer Science and Software Engineering,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.12.14, принята к опубликованию 11.05.15

УДК 316.754

В.Н. Ярская, Н.В. Шеляхина

СПЕЦИАЛЬНЫЕ СОЦИАЛЬНЫЕ СЕТИ В ИНТЕРНЕТЕ С ОГРАНИЧЕНИЕМ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ИНТЕРФЕЙСА

Анализируется современное понимание сетевого подхода и его методов, применяемых на этапах сбора, обработки, анализа данных, полученных непосредственно от серверов социальной сети. По мнению авторов, понимание управляемости процессов в социальных сетях группой профессионалов – модераторов, администраторов социальных сетей представляет собой опыт, их аналитический потенциал может быть использован в качестве экспертных оценок факторов сплоченности в социальных сетях.

Сетевой подход, управляемость, экспертная оценка, аналитический потенциал, фактор сплочённости

V.N. Yarskaya, N.V. Shelyakhina

SOCIAL INTERNET NETWORKING AS A SPECIAL NETWORK WITH A LIMITED USER INTERFACE

The article examines the present-day understanding of the network approach, and the methods used in collecting, processing, and analyzing the data obtained directly from the servers of the social networks. We assume, understanding controllability of the processes in the social networks by a team of professional moderators and administrators of social networks represents the experience, and their analytical capability can be used as expert assessments of cohesion factors in the social networks.

Network approach, controllability, expert evaluation, analytical potential, the factor of cohesion

Социальные сети в интернете представляют собой специальные сети с ограничением пользовательского интерфейса, в нашем исследовании сетевой подход применяется на этапах сбора, обработки, анализа данных, полученных непосредственно от серверов социальной сети. Мы столкнулись с огромным объемом различных определений в специализированной литературе по различным аспектам социальной сплоченности (оборот членства, приверженность организации, идентификация по категориям, межличностная привязанность, сетевые структуры) и направленным на социальную сплоченность конкретных видов социальных групп: семей, школ, воинских частей и спортивных команд. Развивается перспектива социальной сплоченности в качестве домена причинно взаимосвязан-

ных явлений, связанных с отношениями между членами, их поведением, в которых основные аспекты сплоченности занимают различные теоретические позиции по отношению друг к другу: предшествующие, промежуточные или итоговые переменные [Friedkin, 2004].

Для того чтобы лучше понять свойства ссылок и динамику в социальных сетях, некоторые авторы сегодня выделяют постоянные и переходные ссылки, проводят различие между локальным и глобальным влияниями и сравнивают предложения от пользователей, которым оказывается доверие на локальном или глобальном уровнях [Varlamis, Eirinaki, Louta, 2010]. Чтобы показать преимущества и нерешенные вопросы применения графических метрик для анализа социальных сетей и социальных сетей онлайн, в частности, используются метод кейс-стади [Hilbrich, 2008]. Имеются данные об исследовании пользователей с участием экологов, работающих с базами данных в соцсетях, которые описывают взаимодействия между животными, соотнося их с моделями взаимодействий в соцсетях. Полученные данные подтверждают также, что используемый метод визуализации был эффективен для социологического анализа и изучения социальной организации населения [Reda, Tantipathananandh, Johnson, Leigh, Berger-Wolf, 2011].

На основе данных предварительного этапа исследования и у нас возникло понимание управляемости процессов в социальных сетях группой профессионалов – модераторов, администраторов социальных сетей, аналитический потенциал которых может быть использован в качестве экспертных оценок факторов социальной сплоченности в социальных сетях. Кстати, и зарубежные исследователи отмечают научную ценность информации, которую могут предоставить социальные сети для социальных наук. Тем не менее доступные в настоящее время инструменты визуального анализа не очень хорошо подходят для обработки огромной базы данных и часто вынуждают отображать небольшие или сильно удаленные сети. Они представляют метод Honeycomb (сота): инструмент визуализации, который способен иметь дело с гораздо более крупной базой данных (с миллионом ссылок), вводится новая сетевая метрика вероятности для ознакомления пользователей с потенциально интересными или аномальными паттернами и обсуждения уроков, извлеченных в ходе разработки и внедрения [van Ham, Schulz, Dimicco, 2010].

Группа авторов-программистов фокусирует внимание на том факте, что анализ социальных сетей представляет научную ценность для многих областей знаний вне рамок социологии. Это раскрывает невидимые связи между акторами в сети и дает понимание социальных процессов и поведения. Данный метод стал важным в исследованиях Web, организации, а также для политики национальной безопасности. Он представляет визуальный инструмент аналитики OntoVis для понимания масштабных, гетерогенных социальных сетей, в которых узлы и ссылки могут представлять разные понятия и отношения. Уникальные возможности OntoVis иллюстрируются несколькими исследованиями case-studies [Shen, Ma, Eliassi, 2006].

Анализ социальных и технологических сетей привлекает много внимания, так как социальные сетевые приложения и мобильные устройства зондирования предоставляют нам множество реальных данных. Классические исследования занимаются анализом статических или агрегированных сетей, то есть сетей, которые не изменяются с течением времени или построены в результате агрегации информации в определенный период времени. Учитывая растущие накопления измерений, связанные с массивными, реальными сетевыми чертами, исследователи быстро начинают понимать, что связи изменяются с течением времени и демонстрируют большую размерность, чем может уловить статический анализ. Ученые предлагают новые метрики темпоральной дистанции для количественного измерения и сравнения скорости (задержки) процессов распространения информации с учетом эволюции сети как в локальном, так и в глобальном ракурсе. Описываемые метрики способны захватить темпоральные характеристики изменяющихся во времени графиков, такие как задержка, продолжительность и последовательность контактов (взаимодействий), в сравнении с метриками, используемыми в прошлом на статических графиках. Как доказательство концепции эти методы применяются к двум классам изменяющихся во времени сетей, а именно к подключению мобильных устройств и обменам электронной почтой [Tang, Musolesi, Mascolo, Latora, 2009].

Доступ к реалистичным графическим базам данных имеет решающее значение для исследований систем социальных сетей и приложений. В связи с высокими временными и ресурсными затратами по сбору реальных графических баз данных посредством прямых измерений исследователи анонимизируются и обмениваются небольшим количеством ценных баз данных внутри сообщества. В то время как графические модели могут производить реалистичные синтетические графики, это также подчеркивает тот факт, что нынешние показатели графиков остаются неполными, и некоторые приложения обнаруживают графические свойства, которые не подходят существующим метрикам [Sala, Cao, Wilson, Zablit, Zheng, Zhao, 2010]. Для того чтобы лучше понять свойства ссылок и дина-

мику в социальных сетях, авторы делают различие между постоянными и переходными ссылками, локальным и глобальным влияниями, сравнивают предложения от пользователей, которым оказывается доверие на локальном или глобальном уровнях [Varlamis, Eirinaki, Louta, 2010].

Наше качественное исследование базируется на материалах экспертных интервью со специалистами по IT-технологиям, администраторами, лидерами социальных сетей и материалах фокус-группы с активными пользователями и модераторами виртуальных сообществ. Насколько непростым был рекрутинг информантов, свидетельствует отклик интервьюера, который рекрутировал участников.

Обратились с просьбой поучаствовать в опросе к 150 пользователям ВКонтакте, на сегодняшний момент имеем 6 откликов, 1 респондент обещает ответить завтра.

Обращаться можно не более к 20 пользователям в сутки, если они не являются мне друзьями, многие пользователи ограничивают доступ к своим сообщениям для «недрузей», мою страничку уже замораживали, т.к. с нее много рассылок «недрузьям».

Некоторые отрицают принадлежность к определенной группе, указанной в файлах, особенно к группе с украинским названием – по факту в ней состоят представители татарстанских волонтеров, несколько человек обещали, но так и не ответили.

Трудности исследования говорят о том, что информанты очень неохотно раскрываются в сети для незнакомых пользователей, а принадлежность к определенной группе крайне редко означает активное участие в виртуальной жизни сообщества. Действительно же самые активные члены группы с максимальными показателями центральности в ней чаще всего ограничивают доступ к своей страничке, а именно, к отправке им сообщений, что делает невозможным получение информации виртуальной активности внутри сообщества, то есть многие топ-пользователи с высокой степенью центральности в данной группе просто не идут на контакт в сети.

Экспертные интервью¹ проводились осенью 2014 г., они продемонстрировали эффективные способы создания и развития виртуальных сообществ, механизмы воздействия на активность участников социальных сетей в онлайн дискуссиях и реальных мероприятиях. Представленные экспертные мнения характеризуют современные процессы образования виртуальных сообществ с точки зрения возможностей их организации и самоорганизации, управления контентом, захвата аудитории и воздействия на реальное поведение участников групп.

В ходе исследования выяснилось, как выделяются группы, создающиеся для единичного мероприятия, «под ивент» – особый случай, то есть для проведения концерта, флеш-моба, футбольного матча: *«однажды создается группа, реализовали себя и закрываются»*. Продолжительность существования групп в социальных сетях, созданных как инструмент под конкретное событие и случай, задана рамками подготовки и проведения, то есть довольно определенный промежуток времени. Так, при наборе волонтеров на Универсиаду *«была создана группа, в которую будет скидываться вся информация по поводу того, что нужно, чтобы поехать, ... в общем, вся информация по нашей работе в Казани, и, собственно, мы все туда вступили, кто поехал, и как бы, не знаю, ведется она сейчас или нет, потому что она сейчас особо-то и не нужна»* (Инф. 6).

Другой тип группы создается для долгосрочной работы, *«где аккумулируются различные последние мемы, шутки, идеи»* (Инф. 4). Отдельный тип групп – медиаторские, посреднические группы, *«группы помощи, когда людям помогают найти квартиру, попутчиков, люди по перепродаже каких-то вещей, с личной целью, но не с выгодой»* (Инф. 4). На основе данных предварительного этапа исследования возникло понимание управляемости процессов в социальных сетях группой профессионалов – модераторов, администраторов социальных сетей, аналитический потенциал которых может быть использован в качестве экспертных оценок факторов социальной сплоченности в социальных сетях.

При просмотре других групп в качестве сравнения эксперт обращает внимание на состав группы, процессы наполнения группы, идеи, объединяющие группу, нестандартные и уникальные приемы, влияющие на аудиторию. Например, эксперт отметил особый технический прием, PR-ход, на одном из сайтов ивент агентств *«отфоткали себя, устроили небольшую, но интересную фотосессию от ведущей и запустили такую тему, как совет от ведущей»* (Инф. 2), что работает на узнаваемость сотрудников ивент агентств, самого сайта, привлекает внимание, дает повод получить консультацию специалиста.

Интересна следующая интерпретация оценки активности работы группы как постоянного наполнения ее состава: *«если волонтер, то ты должен быть открыт, поэтому все сразу в обсуждение, в диалог, все туда, а как, если группа следит за ней, то понятное дело, что, если кипит обсуж-*

¹Интервью проведены Е. Пашиной в рамках гранта РФФИ, № 14-06-00242, рук. В.Н. Ярская.

дение, то значит, все хорошо. Если люди не уходят, а наоборот, приходят, значит, группа живая и работает» (Инф. 6).

В сетях при этом желательно присутствие сопоставимых по размеру групп, деятельность которых посвящена значимым социальным проблемам, ассоциированным с пониманием социальной сплоченности, доверия. Это участие в волонтерских движениях, деятельность группы в направлениях благотворительности, то есть проблематика связана непосредственно с параметрами социальной сплоченности. Анализ виртуальных социальных сообществ в интернет пространстве проведен в русле микс стратегии, то есть сочетании количественной и качественной методологии. Здесь мы фиксируем внимание лишь на качественной методологии и важности процесса коммуникации между участниками группы, отслеживаемого по добавлению во френдлисты. Поведенческий акт «добавления в друзья» может рассматриваться как показатель зарождающейся и развивающейся условной сплоченности в социальной сети между конкретными ее участниками. Условная виртуальная онлайн сплоченность между лично не встречавшимися в оффлайне участниками перерастает в реальную сплоченность при личной встрече. Таким образом, к техническим приемам продвижения виртуальных сообществ можно отнести работу с контентом, подписчиками, захватом аудитории, статистическим мониторингом численности группы, ее активности и интересующих ее постов, а также создание опросов, «напоминаний», поощрение активных участников.

На наш взгляд, группа является сплоченной, если самостоятельно поддерживает, воспроизводит положительные установки по принадлежности к себе, привлекательность членства и ценность включенности в ее жизнедеятельность, а поведение членов группы стабильно поддерживает эти условия. Сплоченность группы конструирует микромодель параметров заданной социальной группы, уровень солидарности с общими целями, чувство причастности к группе, силу межперсональных связей и симпатий. В противоположность этому макромоделю сплоченности как социетальный показатель социума в перспективе выступает инструментом измерения эффективности социальной политики. Причины создания социальных сетей связаны с формированием нового типа отношений сплоченности между людьми, опосредованными информационными технологиями, позволяющими продвигать и реализовывать проекты коммерческой, политической, социальной направленности с меньшими организационными усилиями и охватом целевой аудитории. В оценках экспертов отмечены признаки, позволяющие выявлять сильные и сплоченные группы в социальных сетях, а также ряд инструментов, регулирующих социальные дистанции и роли участников сообществ.

Для выяснения параметров модели социальной сплоченности мы отмечаем доверие между членами групп, общающихся в социальных сетях. Характеристики таких сообществ и их сравнительный анализ позволяют включить в микромодель сплоченности мотивы участия в группе социальной сети, различия в структуре, способах передачи информации, процессах коммуникации. Модель сплоченности онлайн сообществ опирается на анализ структурных характеристик по отношению к системе связей, анализ распределения степеней акторов как источник сравнения различных социальных сетей.

Основной задачей интервью было получение теоретических взглядов по тематике социальной сплоченности с позиций практиков, которые непосредственно занимаются целенаправленным созданием сплоченности в малых группах (рабочем коллективе). Одной из задач фокус группы было, в том числе, уточнение социальной сплоченности как эмоционального явления, измерение привлекательности членов группы: чем большее количество членов группы нравятся друг другу, тем привлекательнее группа в целом, тем выше индекс групповой сплоченности.

В результате установлено, что моделирование сплоченности возможно и с помощью социометрического коэффициента: частное от деления числа взаимных положительных выборов на теоретически возможное их количество. Шкалы симпатии определяются путем усреднения индивидуальных данных. Важный показатель модели – сплоченность как результат согласия, сходства ценностных ориентаций и взглядов. Человек стремится к людям и группам, с установками и позициями которых он солидарен. С одной стороны, поиски согласия с мнением других людей обусловлены потребностью в социальном признании, обеспечивающем защищенность и эмоциональный комфорт. Данная позиция находит отражение в теории: согласно социально-психологической модели коммуникации позитивная расположенность двух индивидов друг к другу порождает схожее отношение этих индивидов к третьему лицу или объекту.

Развитие сходных аттитюдов прямо пропорционально развитию межличностной коммуникации между двумя индивидами, учащению речевых актов между ними [Newcomb, 1953], подобные аттитюды у индивидов, симпатизирующих друг другу, называются стремлением к «симметрии ориентации». С другой стороны, человек по необходимости взаимосвязан с другими людьми в реализа-

ции цели, успех зависит от согласованности мнений о цели и средствах достижения. Следующий элемент модели – мотивация, мотивационная сплоченность – в зависимости от степени удовлетворения потребностей индивида в группе.

Отталкиваясь от теории социального пространства П. Бурдьё, мы затрагиваем тему социального капитала, предполагающего владение ресурсами, связанными с включением индивида в конкретную социальную группу, а именно, межличностными связями в данной группе. Владение определенными связями в группе определяет социальную позицию индивида и таким образом конструирует его социальное пространство [Bourdieu P., 1993]. Таким образом, возникает мотивация по отношению к достижению определенных межличностных контактов, приобретению определенных связей в группе, и как следствие приобретение более высокой социальной позиции.

Кроме того, приверженность индивидов к своей группе сильнее тяготения к другим группам. Сталкиваясь с «иными», непохожими на членов своей группы индивидами, возникают предрассудки на почве расизма, сексизма, формируемые в обществе медийными установками, практиками сегрегации в социальных институтах, порождающие агрессию, неприязнь, ненависть, в том числе расовую, к внешне иным людям. Здесь играют роль как социальные стереотипы, конструируемые обществом, так и эмоциональные установки по отношению к определенным социальным группам, стремлением упростить восприятие окружающей среды в поиске «виноватых», а также как способа самореализации, самоутверждения своей позиции за счет представителей других групп как выражение социального превосходства [Myers, 2002]. В итоге формируется сплоченность внутри своей группы на основе неприязни к другой.

Стимулирует внутригрупповую сплоченность также ситуация межгруппового соревнования, возникающая при стремлении утвердить свое превосходство над индивидом за счет достижения более высоких позиций в каком-либо отношении. Мы опираемся в нашей рефлексии на теорию, согласно которой межличностные действия внутри группы основаны либо на кооперации, либо на конкуренции: при установках на сотрудничество достигается большая сплоченность внутри группы, эффективнее реализуется достижение общей цели, при установке на конкуренцию, напротив, действует разрушительно на связи. Те же положения относятся и к межгрупповым взаимодействиям, при которых установки на диалог дают больший эффект, чем при установках на конкуренцию, что порождает конфликты [Deutsch M.].

Таким образом, важное значение для сплоченности группы имеют установки на сотрудничество, кооперативные действия для достижения общих целей. Несомненно, согласно вышеприведенным теориям симметрии аттитюдов, мотивации, кооперации внутри группы формируется сплоченность внутри социальной группы, что соотносится с действиями внутри виртуальных сообществ социальных сетей. Здесь наблюдается сплочение членов группы на основе мотивации, кооперативных действий при достижении общих целей, либо сплочение пользователей на основе неприязни к другой социальной группе или группам.

В нашем исследовании мы привлекаем также методологию анализа параметров социального доверия в Твиттере [Lumbreras, Gavalda, 2012]. В целом же традиционные подходы к анализу социальных сетей, сложившийся терминологический тезаурус этого социологического направления содержат готовые паттерны исследовательских подходов, которые позволяют раскрывать характеристики социальной сплоченности, доверия, структуру социального капитала сообществ в сетях. В работе представлен лишь один из фрагментов такого анализа, который может быть расширен за счет введения иных характеристик сетей (степени кластеризации, модулярности, структурной эквивалентности и многих других). Важным направлением анализа является и рассмотрение динамических характеристик сетей, которые связаны с диапазоном соответствующих методов.

Список определений социальной сплоченности можно проследить в десятках исследований. Диапазон проблем, которые рассматриваются в этих исследованиях, простирается от сожалений по поводу общества, которое существовало ранее, до постановки вопросов о повышении характеристик сплоченности общества. В последнем случае идея социальной сплоченности призвана максимизировать символическое богатство культурного многообразия, обещание распространения демократических идеалов, разработки систем, способных обеспечить создание новых механизмов социальной интеграции и участия граждан в управлении.

Мы используем лишь небольшой фрагмент наших эмпирических данных, полученных в ходе опроса, опираемся на утверждение об использовании восприятия тех или иных социальных групп в дихотомии «Свой – Чужой», применяем похожую дихотомию «Близкое – Далекое» в отношении социальной общности, обозначаемой в вопросе «жители всей России». Для нас важен факт некоторого

различия в определении уровня доверия и восприятия народа России как близкой общности в разных городах России.

Это можно объяснить социальным различием городов, в которых проводился опрос, разницей в составе населения, их географического положения. В нашем опросе наибольшую степень доверия и обозначения параметров включенности группы, которая обозначена в ответах, демонстрирует Саратов (63%, см. табл. 2), наименьшую, соответственно, Томск (для этого города значимо смещение в сторону увеличения частоты варианта ответа «Далекое», что отличает последний город от Казани) [Анализ, 2013]. Хотя мы видим некоторые статистически значимые различия в городах, тем не менее общий уровень восприятия граждан России в качестве близкого сообщества в среднем находится на уровне 50%, что вполне сопоставимо с результатами других известных исследований социального доверия граждан.

Широкий набор атрибутивного определения социальной сплоченности является следствием того, что сама традиция социального гражданства, которая характеризует многие общества, предполагает, что социальные права порождают неразрывную связь между социальной интеграцией и предоставлением ее механизмов, дает им чувство полноправного членства в обществе [Алёшина, 2013].

Между тем сетевой подход оказывается сегодня наиболее эффективным в целом ряде онлайн исследований. Концепция социальной сплоченности, как правило, связывается с другими семантически близкими понятиями: равенства – неравенства, социальной интеграции и благополучия, социального доверия, солидарности. Этот список можно продолжать достаточно долго. Социальные интернет сети в настоящее время перестают быть продолжением прежней, повседневной, реальной социальной сети и становятся для некоторых людей избранной наиболее привлекательной надстройкой сети.

Исследование проводится в рамках проекта РФФИ, № 14-06-00242. Социальная сплоченность в российском обществе: состояние, измерение, модель, рук. В.Н. Ярская.

ЛИТЕРАТУРА

1. Friedkin N. E. Social Cohesion / N. E. Friedkin // Annu. Rev. Sociol. 2004. 409 p.
2. Newcomb T. An Approach to the Study of Communicative Acts / T. Newcomb. 1953.
3. Bourdieu P. Espace social et pouvoir symbolique / P. Bourdieu // Les choses dites. Paris: Éditions de Minuit, THESIS, 1993 P. 137-1501987.
4. Myers D. G. Social Psychology / D. G. Myers, 7th ed. 2002.
5. Deutsch M. A theory of cooperation and competition / M. Deutsch // Human Relations. 2/ 1949. 129-152.
6. Varlamis I. A study on social network metrics and their application in trust networks / I. Varlamis, M. Eirinaki, M. Louta // Proc. of the 2010 International Conference on Analysis of Social Networks and Mining (ASONAM 2010), pp. 168-175, August 2010, Odense, Denmark.
7. Hilbrich R. Applicability of Graph Metrics when Analyzing Online Social Networks / R. Hilbrich // Current Issues in IT-Management. January 6. 2008. 26 p.
8. Visualizing the Evolution of Community Structures in Dynamic Social Networks. Department of Computer Science, University of Illinois at Chicago, USA Eurographics / Khairi Reda, Chayant Tantipathananandh, Andrew Johnson, Jason Leigh, and Tanya Berger-Wolf. // IEEE Symposium on Visualization 2011 (EuroVis 2011); Journal compilation 2011. The Eurographics Association and Blackwell Publishing Ltd. Published by Blackwell Publishing, 9600 Garsington Road, Oxford OX4 2DQ, UK and 350 Main Street, Malden, MA 02148, USA. Vol. 30 (2011). Numb. 3
9. van Ham F. Honeycomb: Visual Analysis of Large Scale Social Networks / F. van Ham, H.-J. Schulz, and J. M. Dimicco // IBM TJ Watson Research Center, Cambridge, MA 02142, USA University of Rostock, Rostock, Germany
10. Shen Z. Visual Analysis of Large Heterogeneous Social Networks by Semantic and Structural Abstraction / Z. Shen, K.-liu Ma, and T. Eliassi-Rad // IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics, Special Issue on Visual Analytics, Vol. 12. No. 6. 2006. 1427-1439.
11. Temporal Distance Metrics for Social Network Analysis / J. Tang, M. Musolesi, C. Mascolo, V. Latora // WOSN'09, August 17, 2009, Barcelona, Spain.
12. Measurement-calibrated Graph Models for Social Network Experiments / A. Sala, L. Cao, Ch. Wilson, R. Zablit, H. Zheng and B.Y. Zhao. April 26–30, 2010, Raleigh, North Carolina, USA. 2010.

13. Lumbreras A. Applying Trust Metrics Based on User Interactions to Recommendation in Social Networks / A. Lumbreras, R. Gavalda // 2012 International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining (ASONAM 2012). 2012. P. 1159-1164.

14. Анализ проведён в рамках исследования Минобрнауки РФ, 2012-2013 ДПННТ, № 6.4199.2011, СГТУ-22 по госзаданию на оказание услуг, руководитель В.Н. Ярская.

15. Алешина М.А. Социальная сплоченность как элемент формирования новой социальной политики / М.А. Алешина, В.В. Печенкин // Журнал инновационной деятельности. 2013. С. 133-143.

Ярская Валентина Николаевна –
заслуженный деятель науки Российской Федерации, профессор кафедры «Социология, социальная антропология и социальная работа» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Valentina N. Yarskaya –
Honoured Master of Science of the Russian Federation, Professor Department of Sociology, Social Anthropology and Social Work, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Шеляхина Наталия Владимировна –
кандидат социологических наук, социолог Социологического центра Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Natalia V. Shelyakhina –
Ph. D., Sociologist Centre for Sociology at Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 11.01.15, принята к опубликованию 11.05.15

ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.22

М.С. Анкудинова, Е.А. Ларин, Л.А. Сандалова

МЕТОДЫ РАСЧЕТА И УЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА ПРИ ВЫБОРЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ ОТОПИТЕЛЬНЫХ ПГУ

Изложены методы и модели расчета и учета надежности при выборе рациональных схем отопительных парогазовых установок в системах теплоэнергоснабжения.

Парогазовые установки, показатели надежности, вероятностные модели, схемы, эффективность

M.S. Ankudinova, E.A. Larin, L.A. Sandalova

CALCULATION AND ACCOUNTING METHOD OF HRSG RELIABILITY MEASURES WHEN SELECTING SUSTAINABLE CONFIGURATIONS OF COMBINED CYCLE COGENERATION POWER PLANTS

The calculation methods for accounting reliability measures when selecting sustainable configurations of combined cycle cogeneration power plants in the power supply systems are described.

Combined cycle gas turbine power plant, reliability measures, stochastic model, configurations, effectiveness

Общие положения. Совершенствование бинарных парогазовых установок (ПГУ) связано с повышением температуры газа перед газовой турбиной (до 1600-1700 °С), начальных параметров пара (вплоть до суперсверхкритических с одним или двумя промежуточными перегревами пара), усложнением тепловых схем установок (применением двух и трех уровней давлений генерируемого в котлах-утилизаторах (КУ) пара), комбинированной выработкой электрической и тепловой энергии, реализацией их конкурентных преимуществ (в частности, термодинамической эффективности и маневренных характеристик) в системах теплоэнергоснабжения. Поэтому выбор рациональных схем отопительных ПГУ должен проводиться с учетом климатических факторов, структуры тепловых нагрузок и режимов потребления тепловой и электрической энергии, надежности работы ПГУ в системах теплоэнергоснабжения.

Под надежностью систем теплоэнергоснабжения на базе ПГУ понимается управляемое их комплексное свойство обеспечивать потребителей тепловой и электрической энергией необходимого качества в требуемом в данный момент времени в соответствии с графиками энергопотребления количестве в течение определенного периода времени и недопущение ситуаций, опасных для людей и окружающей среды [1-3].

Выбор и обоснование показателей надежности. Структурно-сложные отопительные ПГУ и системы на их основе являются восстанавливаемыми энергетическими объектами, поэтому отказы установок и систем следует делить на отказы работоспособности и отказы функционирования. Первая категория отказов связана с переходом элемента установки или системы в момент времени t из работоспособного состояния в неработоспособное (или частично неработоспособное). Отказы функционирования связаны с тем, что система в данный момент времени t не обеспечивает (или частично не обеспечивает) заданный потребителем уровень энергоснабжения. В качестве единичных показате-

лей надежности (ПН) элементов или энергоустановок в целом используются известные показатели: интенсивность отказов – $\lambda(t)$; интенсивность восстановлений $\mu(t)$; вероятность безотказной работы в течение периода времени $t – P(t)$; вероятность восстановления за период времени $t – F(t)$. В качестве комплексного ПН, как правило, используется динамический или стационарный коэффициенты готовности, рассчитываемые как

$$k_r(t) = \frac{\mu(t)}{\mu(t) + \lambda(t)}, \quad k_r = \mu / (\mu + \lambda). \quad (1)$$

В качестве интегральных показателей надежности используются:

– коэффициент обеспеченности энергией π , определяемый по формуле

$$\pi = 1 - [M \{ \Delta W \} / W_{пл}], \quad (2)$$

где $M \{ \Delta W \}$ – математическое ожидание недоотпуска потребителю энергии за плановый период времени работы системы теплоэнергоснабжения $T_{пл}$; $W_{пл}$ – плановый отпуск потребителю энергии за этот же период времени;

– динамический вероятностный показатель надежности систем теплоэнергоснабжения, учитывающий как полные и частичные отказы работоспособности, так и отказы функционирования – коэффициент эффективности функционирования системы $k_s(t)$, рассчитываемый по формуле

$$k_s(t) = P\{t, \Phi \geq \Phi_s\} \cdot P\{t, \Phi_s \geq \Phi_{тр}\}, \quad (3)$$

где $P\{t, \Phi \geq \Phi_s\}$ – вероятность того, что в момент времени t значение выходного эффекта системы (уровень отпускаемой энергии) Φ будет не ниже некоторого заданного значения Φ_s ; $P\{t, \Phi_s \geq \Phi_{тр}\}$ – вероятность того, что в момент времени t величина выходного эффекта Φ_s будет не ниже требуемого графиком нагрузок потребителя $\Phi_{тр}$.

Термодинамический анализ отопительных ПГУ. Особенности термодинамического анализа и расчета системной топливной эффективности рассмотрим на примере наиболее сложной отопительной ПГУ, выполненной по схеме с тремя уровнями давления генерируемого в котле-утилизаторе (КУ) пара, представленной на рис. 1. На рис. 2 приведен условный термодинамический цикл, реализующий приведенную схему ПГУ.

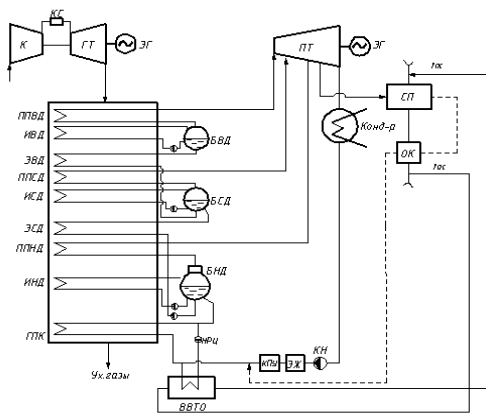


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема отопительной ПГУ с тремя уровнями давления генерируемого пара

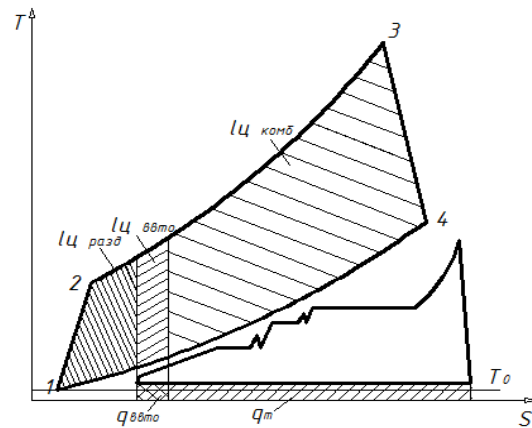


Рис. 2. Условный термодинамический цикл отопительной ПГУ с тремя уровнями давления генерируемого пара

Из рис. 2 следует, что полезную работу газотурбинной установки (ГТУ) можно представить в виде суммы трех составляющих. Первая составляющая $\Delta I_{ц}^{комб}$ характеризует высокоэффективную работу ГТУ в комбинированном цикле на тепловом потреблении паротурбинного цикла за счет полезного использования теплоты уходящих газов в КУ. Вторая составляющая $\Delta I_{ц}^{ВВТО}$ характеризует эффективную работу на тепловом потреблении за счет утилизации теплоты уходящих газов в водоводяном теплообменнике (ВВТО). Третья составляющая $\Delta I_{ц}^{разд}$ соответствует низкоэффективной выработке полезной работы, которая может приводить к перерасходу топлива в системе. Полезную работу паротурбинного цикла традиционно можно представить двумя составляющими. Первая характеризует выработку электроэнергии на тепловом потреблении за счет использования отборного пара на теплоснабжение, а вторая соответствует конденсационной выработке.

Расчет важнейшего показателя эффективности – удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении для ПГУ с водоводяным теплообменником (ВВТО), встроенным в газовый подогреватель конденсата (ГПК), также имеет некоторые особенности.

Теплота топлива газотурбинного цикла используется для раздельной, комбинированной выработки электрической энергии и для получения тепла в ВВТО

$$N_{ГТУ} = \Delta N_{ГТУ}^{КОМБ} + \Delta N_{ГТУ}^{ВВТО} + \Delta N_{ГТУ}^{РАЗД}, \quad (4)$$

где $\Delta N_{ГТУ}^{КОМБ} = N_{ГТУ} \cdot \phi_{кУ}$ – часть мощности ГТУ, выработанной комбинированным способом;

$$\phi_{кУ} = \frac{Q_{КУ}^{\partial}}{Q_{КУ}^{расч}} = \frac{G_{nc}(h_{\theta 1} - h_*)}{G_{nc}(h_{\theta 1} - h_{oc})} - \text{доля располагаемой теплоты утилизации, используемой для комби-}$$

нированной выработки электроэнергии в паротурбинном цикле; $\Delta N_{ГТУ}^{ВВТО} = N_{ГТУ} \cdot \phi_{ВВТО}$ – часть мощ-

$$\text{ности ГТУ на базе теплоты, переданной в ВВТО; } \phi_{ВВТО} = \frac{Q_{ВВТО}^{\partial}}{Q_{КУ}^{расч}} = \frac{G_{nc}(h_* - h_{yx})}{G_{nc}(h_{\theta 1} - h_{oc})} - \text{доля теплоты}$$

ВВТО от располагаемой теплоты утилизации; $\Delta N_{ГТУ}^{РАЗД} = N_{ГТУ} \cdot \phi_2$ – часть мощности ГТУ, выработан-

$$\text{ной так называемым раздельным способом; } \phi_2 = \frac{Q_{ГТУ}^{\partial}}{Q_{КУ}^{расч}} = \frac{G_{nc}(h_{yx} - h_0)}{G_{nc}(h_{\theta 1} - h_{oc})} - \text{доля теплоты с уходящими}$$

газами; $h_{\theta 1}, h_0, h_*, h_{yx}, h_{oc}$ – соответственно, энтальпия продуктов сгорания после ГТУ, КУ, ВВТО, уходящих газов и окружающей среды.

Часть теплоты утилизации газотурбинного цикла, используемой для комбинированной выработки электроэнергии в паротурбинном цикле, необходимо разделить на выработку электрической и тепловой энергии. Кроме того, часть теплоты в паротурбинном цикле используется для комбинированной выработки электроэнергии на тепловом потреблении. Тогда величину $\Delta N_{ГТУ}^{КОМБ}$ следует разделить на две составляющие

$$\Delta N_{ГТУ}^{КОМБ} = \Delta N_{ГТУ}^{ТФ} + \Delta N_{ГТУ}^P,$$

где $\Delta N_{ГТУ}^{ТФ} = \Delta N_{ГТУ}^{КОМБ} \cdot \frac{\Delta N_{ПГУ}^{ТФ}}{N_{ПГУ}}$ – часть мощности комбинированной выработки в газотурбинном цик-

ле, приходящаяся на теплофикационную выработку в паротурбинном цикле; $\Delta N_{ГТУ}^{ТФ}$ – часть мощности $\Delta N_{ГТУ}^{КОМБ}$, выработанной в газотурбинном цикле относимая к раздельному способу в комбинированном парогазовом цикле.

Величину $\Delta N_{ГТУ}^{ТФ}$ можно рассчитать по формуле

$$\begin{aligned} \Delta N_{ПГУ}^{ТФ} = & D_o^{ВД} (h_0 - h_*) + (D_o^{ВД} + D_o^{СД}) (h_{см} - h_{**}) + \\ & + (D_o^{ВД} + D_o^{СД} + D_o^{НД}) (h_{см*} - h_{отб}) \end{aligned}, \quad (5)$$

где $D_o^{ВД}, D_o^{СД}, D_o^{НД}$ – соответственно, расходы пара высокого, среднего и низкого давления; $h_0, h_*, h_{**}, h_{см}, h_{см*}, h_{отб}$ – соответственно, энтальпия свежего пара, пара после ЦВД и ЦСД, в точках смешения пара в турбине за счет подвода пара в проточную часть, отборного пара.

При расчете удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении y_3 необходимо учитывать ту часть электроэнергии, которая была выработана в газотурбинном цикле с учетом теплофикационного отбора в турбине – $\Delta N_{ГТУ}^{ТФ}$, часть электроэнергии, выработанной на базе теплоты теплофикационного отбора в паротурбинном цикле – $\Delta N_{ПГУ}^{ТФ}$ и часть электроэнергии, выработанной в газотурбинном цикле на базе теплоты, отданной в ВВТО – $\Delta N_{ГТУ}^{ВВТО}$. Поэтому формула для расчета величины y_3 примет вид

$$y_3 = \frac{\Delta N_{ГТУ}^{ВВТО} + \Delta N_{ГТУ}^{ТФ} + \Delta N_{ПГУ}^{ТФ}}{Q_{ВВТО} + Q_{отп}}, \quad (5)$$

где $Q_{ВВТО}$ – теплота, отданная в ВВТО; $Q_{отп}$ – теплота, отданная в теплофикационном отборе паровой турбины.

Конструктивные характеристики КУ ПГУ. Сравнительный анализ характеристик КУ проведен для схем бинарных ПГУ, отличающихся числом уровней давлений генерируемого в КУ пара и выполненных на базе ГТУ типа PG6111FA фирмы General Electric мощностью 77 МВт со следующими характеристиками: степень повышения давления в компрессоре 15,8, расход воздуха через компрессор 203,3 кг/с, температура продуктов сгорания после турбины 600°C. В качестве паровой турби-

ны принята турбина типа Т-25/33-7,6/0,12 ОАО «Калужский турбинный завод» с параметрами свежего пара высокого давления 8,6 МПа и 535 °С. С использованием нормативных методик и разработанного комплекса программ [5, 6] определены характеристик КУ ПГУ, выполненной по схемам с одним, двумя и тремя контурами, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики КУ ПГУ, выполненной по схеме с одним, двумя и тремя уровнями генерируемого давления пара

Элемент	Средний температурный напор, °С	Коэффициент теплопередачи, Вт/м ² ·К	Тепловая мощность, МВт	Площадь теплообменной поверхности, м ²
Трехконтурный КУ				
ППВД	104.7	19.87	23.47	11 282
ИВД	73.55	22.1	45.58	28 042
ЭВД	19.63	18.9	9.9	26 679
ППСД	11.51	12.37	0.103	724
ИСД	19.27	21.74	2.19	5 228
ЭСД	39.69	20.98	0.388	466
ППНД	53.62	36.34	0.826	424
ИНД	38.69	17.22	14.33	21 506
ГПК	22.44	17.79	16.43	41 654
Суммарные тепловая мощность и поверхность КУ			113.21	136 005
Двухконтурный КУ				
ППВД	104.65	19.87	23.5	11 299
ИВД	73.5	23.5	45.65	26 406
ЭВД	31.85	18.9	20.22	33 576
ППНД	26.64	35.45	0.478	506
ИНД	25.81	17.21	8.29	18 653
ГПК	18.52	17.75	14.39	43 764
Суммарные тепловая мощность и поверхность КУ			112.53	134 204
Одноконтурный КУ				
ПЕ	106.34	19.87	22.25	10 530
ИСП	74.91	23.5	42.61	24 206
ГПК	27.37	18.9	27.82	53 773
Суммарные тепловая мощность и поверхность КУ			92.68	88 509

Из табл. 1 следует, что с усложнением схемы ПГУ поверхность теплообмена КУ возрастает, что обуславливает снижение его показателей надежности.

Энергетические характеристик и системная топливная эффективность отопительных ПГУ. В табл. 2 приведены результаты расчетов энергетических показателей отопительных ПГУ, выполненных по различным схемам при различных температурах наружного воздуха.

Таблица 2

Энергетические характеристики отопительных ПГУ

Наимен.	Режим	$N_{ПГУ}$	$N_{ПГУ}$	$Q_{ВВТО}$	$Q_{ОГБ}$	$\Delta N_{ПГУ}^{ВВТО}$	$\Delta N_{ПГУ}^{КОМБ}$	$\Delta N_{ПГУ}^{ТФ}$	$\Delta N_{ПГУ}^{ТФ}$	уэ
Ед. изм.	°С	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	-
I давл.	+30	75,4	27,9	5,66	25,09	3,08	57,17	47,34	23,19	2,39
	+15	77,42	26,45	5,8	25,11	3,27	54,43	41,14	19,99	2,08
	-1,8	78,74	25,23	6,79	82,38	3,62	52,96	51,98	24,77	0,9
	-26	79,2	25,12	7,5	81,99	3,68	48,27	47,35	24,63	0,85
II давл.	+30	75,4	28,85	5,66	25,09	3,08	63,57	51,65	23,44	2,54
	+15	77,42	27,7	5,8	25,11	3,27	59,3	42,66	19,95	2,13
	-1,8	78,74	26,8	6,79	82,38	3,62	61,13	58,91	25,82	0,99
	-26	79,2	27,3	7,5	81,99	3,68	58,22	55,37	25,92	0,95
III давл.	+30	75,4	31,86	5,66	25,09	3,08	65,45	49,78	24,23	2,51
	+15	77,42	31,49	5,8	25,11	3,27	64,43	43,06	21,05	2,18
	-1,8	78,74	30,41	6,79	82,38	3,62	62,86	55,91	27,04	0,97
	-26	79,2	31,54	7,5	81,99	3,68	59,82	49,55	26,11	0,88

Широко используемые в настоящее время показатели эффективности отопительных ПГУ, такие как абсолютный электрический КПД $\eta_{э}$, КПД по выработке электроэнергии $\eta_{э(пгу)}$, удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении $u_{э}$, коэффициент использования теплоты топлива $K_{ит}$ в отдельности не отражают степень использования максимальной работы, не учитывают параметры

отпускаемой тепловой энергии, не оценивают экономию от комбинированной выработки электроэнергии и теплоты и не могут являться критериями выбора оптимальных решений проектируемых отопительных ПГУ. Величины удельных расходов топлива на выработанные электрическую и тепловую энергию также не могут быть показателями совершенства, т.к. распределение расхода топлива является условным. Поэтому при сравнительном анализе использован показатель величины абсолютной ΔB_c и относительной β системной экономии топлива при использовании отопительных ПГУ по сравнению с раздельной схемой выработки электрической и тепловой энергии, определяемой как

$$\Delta B_c = (B_{кэс} + B_{кот}) - B_{пгу} + \Delta B_{над}, \quad \beta = \Delta B_c / B_{пгу}, \quad (6)$$

где $B_{кэс}$, $B_{кот}$ – соответственно, расходы топлива на выработку электроэнергии и тепловой энергии в раздельной схеме; $B_{пгу}$ – расход топлива в ПГУ; $\Delta B_{над}$ – дополнительные системные затраты (экономия) топлива, связанные с обеспечением заданных показателей надежности электро- и теплоснабжения потребителей.

Расчетно-теоретическими исследованиями установлено, что удельная системная экономия топлива для схем ПГУ с тремя уровнями давления генерируемого пара составляет 0,31-0,38 в зависимости от тепловых нагрузок и климатических факторов.

Методы расчета показателей надежности элементов энергетического оборудования ПГУ. Расчет ПН элементов энергооборудования должен базироваться на основе вероятностных методов, позволяющих учесть статистическое рассеяние характеристик прочности и нагруженности с использованием теории случайных величин и случайных функций [1-4].

В основу математической модели расчета безотказности КУ положено следующее:

- КУ делится на зоны, каждая из которых вносит свой вклад в вероятность отказа. При этом экономайзерная зона содержит четыре участка, испарительная имеет участки развитого кипения и ухудшенного теплообмена, перегревательная зона состоит из двух участков;

- действующие напряжения являются случайными величинами, разброс которых относительно математического ожидания определяется глобальными и локальными факторами, распределенными по нормальному закону;

- служебные характеристики применяемых материалов (предел длительной прочности и предел выносливости) являются случайными величинами, распределенными по нормальному или логарифмически нормальному законам;

- оценка безотказности проводится из условия определения вероятности превышения действующих напряжений над допустимыми на каждом расчетном участке. Для определения этого условия используются свертки дифференциальных функций распределения действующих напряжений и их предельных значений.

В соответствии с феноменологическим подходом к расчету надежности элементов энергооборудования [2, 4] под безотказностью элемента следует понимать вероятность превышения величины нагружения $X(t)$ прочности $Y(t)$, то есть попадания случайной функции работоспособности (ФР) $Z(t) = Y(t) - X(t)$ в область отрицательных значений. Значения аргументов функции $X(t)$ и $Y(t)$ в общем случае определяются их номинальными значениями x_i^H и y_j^H , а также постоянными Δx_i и Δy_i и переменными во времени δx_i и δy_j отклонениями. Если в КУ выделено m ($m = I, \hat{m}$) зон, а безотказность каждой из них характеризуется n ($n = I, \hat{n}$) ФР, то условие безотказности запишется в виде

$$Z_{n,m}(t) = \{\min[Y_{nk}(t) - X_{nk}(t)]\}_m > 0, \quad m \in \hat{m}; n \in \hat{n}, \quad (7)$$

где k – количество анализируемых зон КУ.

Случайные колебания ФР $Z_{n,m}(t)$ около $Z_{n,m}^{cm}(t)$ определяются стационарными случайными функциями изменения расхода $\partial G(t)$, давления $\partial P(t)$, температуры $\partial T(t)$ и описываются законом

$$F\{Z_{n,m}(t) / Z_{n,m}^{cm}(t)\} = (\sqrt{2\pi}\tilde{\sigma}_z)^{-1} \exp\{-[Z_{n,m}(t) - Z_{n,m}^{cm} / 2\tilde{\sigma}_z^2]\}, \quad (8)$$

где $\tilde{\sigma}_z^2 = (\tilde{\sigma}_z^l)^2 + (\tilde{\sigma}_z^r)^2$, $\tilde{\sigma}_z^l$, $\tilde{\sigma}_z^r$ – среднеквадратичные отклонения ФР $Z_{n,m}(t)$ из-за переменных во времени локальных и глобальных отклонений.

В общем случае, когда несколько ФР определяют безотказность, то есть при $\hat{n} > I$, вероятность безотказной работы запишется в виде

$$P(t) = P\{Z_{n,m}(t) > 0\}_m, \quad m \in \hat{m}. \quad (9)$$

Если ФР $Z_{n,m}(t)$ независимы, то

$$P(t) = \prod_{m=1}^{\hat{m}} \prod_{n=1}^{\hat{n}} P_{nm} \{Z_{n,m}(t) > 0\}. \quad (10)$$

Вероятность того, что для m -го участка КУ (опуская индекс m) действующие напряжения $\sigma(t)$ превысят допустимые $\bar{\sigma}(t)$, то есть $Z(t) \geq 0$, определится как

$$F[\sigma(t) > \bar{\sigma}(t)] = \iint f(\sigma, \bar{\sigma}, t) d\sigma d\bar{\sigma}, \quad (11)$$

где $f(\sigma, \bar{\sigma}, t)$ – совместная дифференциальная функция распределения вероятностей эквивалентных напряжений и длительной прочности.

Условие работоспособности участка КУ имеет вид $\xi(t) = \sigma(t) - \bar{\sigma}(t) < 0$, тогда используя его для определения областей интегрирования (9), получим

$$P\{\sigma(t) < \bar{\sigma}(t)\} = 1 - F[\xi(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\xi + \bar{\sigma}} f(\sigma, \bar{\sigma}, t) d\sigma d\bar{\sigma}. \quad (11)$$

Наряду со стационарными напряжениями трубный пучок испарительной зоны КУ испытывает переменные термические напряжения, обусловленные пульсациями температур. Наибольший размах температурных пульсаций достигается на участке ухудшенного теплообмена и обусловлен поочередным омыванием внутренней стенки трубки кипящей водой и паром. Максимальное значение температурных пульсаций не превышает значения $\Delta t_{\max} = t_r - t_s$, где t_r – температура греющей среды (продуктов сгорания после газовой турбины) в соответствующей зоне КУ; t_s – температура насыщения. Размах температурных пульсаций определяется условиями теплопередачи и рассчитывается по формуле

$$\Delta t_{II} = \frac{\Delta t_{\max} (\alpha_2^* - \alpha_2)(R_1 + R_{cm})}{1 + (\alpha_2^* + \alpha_2)(R_1 + R_{cm}) + \alpha_2^* \alpha_2 (R_1 + R_{cm})^2}, \quad (12)$$

где α_2^* , α_2 – коэффициенты теплоотдачи при ухудшенном теплообмене и режиме развитого кипения, Вт/(м². гр); R_1 , R_{cm} – термические сопротивления теплоотдачи от газа к стенке и сопротивление стенки, (м². гр)/Вт.

Так как величина $\Delta t_{II} < \Delta t_{\max}$, амплитуда температурных напряжений $\sigma_a < \sigma_a^{\max}$, значения которых определяются как

$$\sigma_a = \frac{\alpha E}{1 - \nu} \frac{\Delta t_{II}}{2}; \quad \sigma_{\max} = \frac{\alpha E}{1 - \nu} \frac{\Delta t_{\max}}{2}. \quad (13)$$

Учитывая, что $0 < \sigma_a < \sigma_a^{\max}$, можно считать, что случайная величина σ_a распределена по усечённому закону Рэлея с параметрами ε и ε_{σ_2} , то есть

$$f(\sigma_a) = \frac{\varepsilon \sigma_a}{S_{\sigma_a}^2} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_a}{S_{\sigma_a}}\right)^2\right], \quad (14)$$

где $\varepsilon = [1 - \exp(-\sigma_{a\max}^2 / 2S_{\sigma_a}^2)]_{\sigma_{a\max}}$ – параметр усечения, определяемый из условия нормировки $\int_0^{\sigma_{a\max}} f(\sigma_a) d\sigma_a = 1$.

Расчёт на усталость проводится из условия сравнения эквивалентных амплитуд σ_{σ} , приведённых к симметричному циклу, с пределом выносливости или путём сравнения рабочих амплитуд напряжений σ_a с предельными значениями. Воспользуемся вторым подходом. При этом предельная амплитуда напряжений $\sigma_{a0} = \sigma_{-1} + \psi \bar{\sigma}$. Приняв величины σ_{-1} и $\bar{\sigma}$ случайными и распределёнными по нормальным законам, параметры распределения предельной амплитуды напряжений определяется как

$$\langle \sigma_{a0} \rangle = \langle \sigma_{-1} \rangle + \psi \langle \bar{\sigma} \rangle; S_{\sigma_{a0}} = [S_{\sigma_{-1}}^2 - \psi^2 S_{\bar{\sigma}}^2],$$

где $\langle \sigma_{-1} \rangle$, $\langle \bar{\sigma} \rangle$, $S_{\sigma_{-1}}^2$, $S_{\bar{\sigma}}^2$ – соответственно, математические ожидания и дисперсии соответствующих случайных величин.

Расчёт вероятности безотказной работы при усталостном нагружении испарительного участка поверхности теплообмена в зоне ухудшенного теплообмена КУ сводится к определению вероятности неперевышения амплитуды рабочих напряжений σ_a допустимых значений σ_{ad} . Для получения этой вероятности проинтегрируем плотность вероятности совместной функции распределения случайных величин σ_a и σ_{ad} , умноженную на дифференциалы аргументов по областям их изменения, определяемым неравенствами $-\infty < \sigma_{ad} < \sigma_{amax}$ и $\sigma_{ad} < \sigma_a < \sigma_{amax}$

$$P\{\sigma_a < \sigma_{ad}\} = \int_{-\infty}^{\sigma_{amax}} f(\sigma_{ad}) \int_{\sigma_{ad}}^{\sigma_{amax}} f(\sigma_a) d\sigma_{ad} \cdot \quad (15)$$

Учитывая вклад каждого петли теплообменной поверхности в общую надёжность, вероятность безотказной работы КУ определится как

$$P(t) = \{P(\sigma < \bar{\sigma}, t) P(\sigma_a < \sigma_{ad}, t)\}^m, \quad (16)$$

где m – количество петель теплообменной поверхности в выделенной зоне КУ.

С использованием разработанных методических положений проведены расчетно-теоретические исследования по определению влияния величины коэффициентов запаса κ_3 и дисперсий случайных величин действующих и предельных напряжения на величину вероятности отказа КУ. На рис. 3 показано изменение вероятности отказа $q=(1-P)$ КУ в зависимости от величины коэффициента запаса κ_3 и дисперсии действующих напряжений и их предельных значений.

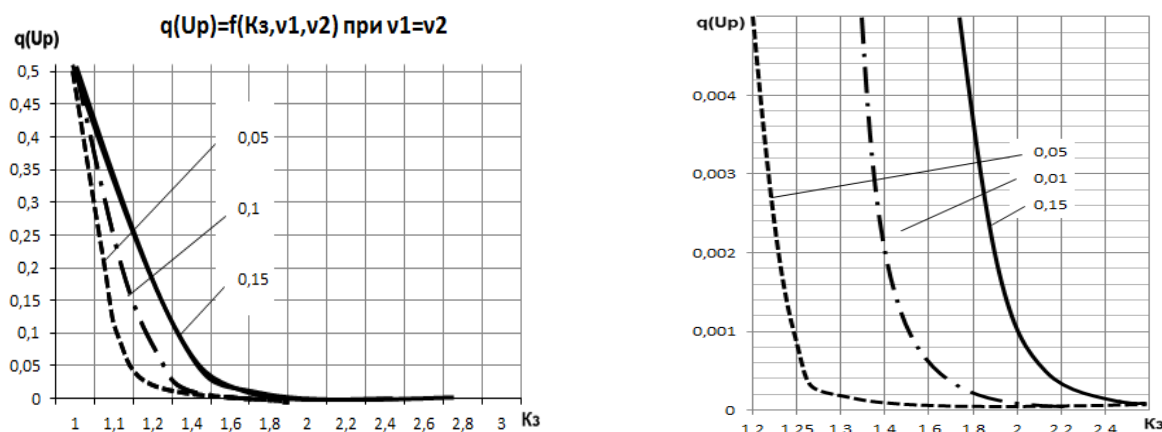


Рис. 3. Влияние коэффициента запаса κ_3 на вероятность отказа элемента

В связи с тем, что значения действующих напряжений зависят от большого числа факторов, значения дисперсии действующих напряжений $D(\sigma_d)$ существенно выше, чем величина $D(\sigma_{np})$. Из рис. 1 следует, что, например, при значении $\kappa_3=1,8$ увеличение величины коэффициента вариации $v_\sigma = D(\sigma_d)/\bar{\sigma}_d$ от 0,05 до 0,15 приводит к росту величины q на порядок. Это свидетельствует о необходимости тщательного обоснования законов и параметров распределения случайных величин действующих и предельных напряжений, т.е. величины v_σ . Рассчитанные по (1) значения коэффициентов готовности КУ ПГУ, выполненных по различным схемам, приведены в табл. 3.

Изложенные методические положения расчета безотказности КУ использованы для расчета значений коэффициентов готовности ПГУ.

Таблица 3

Расчетные значения коэффициентов готовности КУ структурно сложных ПГУ

Время восстановления, ч	Интенсивность восстановления КУ, 1/ч	Коэффициенты готовности		
		Трехконтурный КУ	Двухконтурный КУ	Одноконтурный КУ
24	0,04	0,9741	0,9812	0,9877
36	0,03	0,9615	0,9720	0,9817
48	0,02	0,9492	0,9629	0,9757

Таким образом, разработанная вероятностная модель расчета безотказности КУ парогазовых установок бинарного типа позволяет выявить влияние термодинамических параметров, расходных и конструктивных характеристик КУ на показатели их надежности. Установлено, что усложнение схем ПГУ, т.е. применение КУ с двумя и тремя контурами приводит к росту суммарной теплообменной поверхности и снижению показателей надежности.

Сравнительная эффективность схем отопительных ПГУ. В качестве критерия при сравнительном анализе эффективности различных схем ПГУ использован экономический критерий чистого дисконтированного дохода (ЧДД) при соблюдении условий энергетической сопоставимости вариантов, различающихся показателями надежности. Сопоставимость вариантов обеспечена расчетом дополнительных системных затрат на обеспечение заданного уровня надежности систем электро- и теплоснабжения. В табл. 4 приведены результаты сравнительного анализа эффективности вариантов отопительных ПГУ.

Таблица 4

Основные экономические показатели проектов строительства ПГУ ТЭЦ

Показатель	Ед. изм.	Схема ПГУ		
		I давления	II давления	III давления
Капиталовложения	млн руб.	5280,0	5436,1	5442,3
Чистый дисконтированный доход	млн руб.	2482,1	2579,1	2851,7
Внутренняя норма доходности	-	0,166	0,167	0,171
Индекс доходности	-	1,37	1,37	1,41
Дисконтированный срок окупаемости	лет	13,0	12,5	12,0

Из табл. 4 следует, что наиболее эффективной является схема с тремя уровнями давления генерируемого в КУ пара.

Заключение

1. Разработан комплекс вероятностных моделей расчета показателей надежности комбинированных многоцелевых теплоэнергетических установок в системах теплоэнергоснабжения. Комплекс моделей и расчетных программ может быть использован для решения большого круга конкретных задач оптимизации схем и параметров комбинированных теплоэнергетических установок и систем, а также определения эффективности обеспечения заданных показателей надежности энергообеспечения путем применения различных способов резервирования.

2. Теоретическими и расчетными исследованиями установлено, что усложнение схем ПГУ приводит к снижению показателей надежности. Однако наибольшая системная эффективность достигается в схеме с трехконтурным котлом-утилизатором.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гнеденко Б.В. Математические методы в теории надежности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. М.: Науча, 1985. 524 с.
2. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС: учеб. пособие для теплоэнергетических и энергомашиностроительных вузов / Г.П. Гладышев, Р.З. Аминов, В.З. Гуревич и др.; под ред. А.И. Андрущенко. М.: Высш. шк., 1991. 303 с.
3. Ларин Е.А. Методы и модели расчета и обеспечения надежности комбинированных теплоэнергетических установок и систем / Е.А. Ларин // Вестник СГТУ. 2004. № 3(4). С. 44-57.
4. Теория вероятностей: учеб. для вузов / Е.С. Вентцель. 10-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2006. 575 с.
5. Расчет и рекомендации по проектированию поперечно-оребранных конвективных поверхностей нагрева стационарных котлов. РТМ 108.030.140-87. М., 1988. С. 30.
6. Программа для ЭВМ «Расчет и выбор котла-утилизатора газотрубного». Св. о гос. рег. №2014660962.- 20 октября 2014 г.

Анкудинова Мария Сергеевна – аспирант кафедры «Теплоэнергетика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Mariya S. Ankudinova – Postgraduate Department of Thermal Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Ларин Евгений Александрович –
кандидат технических наук, профессор кафедры
«Теплоэнергетика»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Eugeniy A. Larin –
Ph. D., Professor
Department of Thermal Power Engineering,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Сандалова Лидия Александровна –
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Теплоэнергетика»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Lidia A. Sandalova –
Ph. D., Associate Professor
Department of Thermal Power Engineering,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20.01.15, принята к опубликованию 11.05.15

УДК 658.26

И.В. Долотовский, Е.А. Ларин, Н.В. Долотовская

**СТРУКТУРНАЯ И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ
СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ УСТАНОВОК ПОДГОТОВКИ
И ТРАНСПОРТИРОВКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА**

Приведена методика оптимизации состава оборудования и режимов эксплуатации систем охлаждения установок подготовки и транспортировки природного газа, учитывающая динамику развития газового промысла, климатические и технико-экономические факторы. Обоснованы параметры системы охлаждения установок транспортирования газа северных регионов.

Природный газ, подготовка и транспортирование, охлаждение, оптимизация, эффективность

I.V. Dolotovskij, E.A. Larin, N.V. Dolotovskaja

**STRUCTURAL AND PARAMETRIC OPTIMIZATION
OF THE COOLING SYSTEMS FOR PREPARATION
AND TRANSPORTATION OF NATURAL GAS**

The paper presents a technique for optimization of the equipment and modes used in operating the cooling systems installed in the units for preparation and transportation of natural gas, which takes into account the dynamics of the gas field and climate, including the technical and economic factors. The parameters of the cooling system installations used for transporting gas to the northern regions are substantiated.

Natural gas, preparation and transportation, cooling, optimization, effectiveness

При подготовке природного газа к транспортировке или переработке и на компрессорных станциях (КС) магистральных газопроводов (МГ) его охлаждение является обязательным технологическим процессом, а установки охлаждения газа (УОГ) входят в состав основного оборудования газоперерабатывающих и газотранспортных предприятий [1], характерной особенностью которых является взаимосвязь с газовым месторождением в динамике развития – от начала эксплуатации до периода падающей добычи, при изменении в процессе разработки устьевых температуры и давления, компонентно-фракционного состава, климатических и экологических факторов.

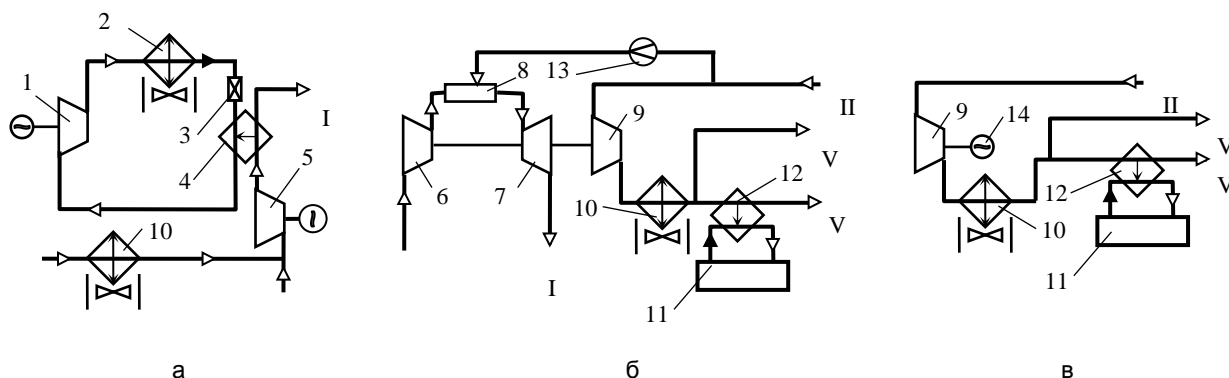
В этих условиях актуальной является задача выбора оптимальной структуры УОГ и рациональных режимов эксплуатации в соответствии с прогнозируемой динамикой технологических процессов блоков подготовки газа (БПГ) и КС МГ.

На промыслах в УОГ БПГ наиболее простым методом охлаждения природного газа является процесс низкотемпературной сепарации (НТС) с использованием избыточного пластового давления. Однако по мере истощения запасов газового месторождения давление в газоносных пластах падает и для продления срока работы установок НТС на завершающей стадии эксплуатации применяется искусственное охлаждение (рис. 1а). Использование холода в последующих процессах низкотемпературной конденсации повышает эффективность переработки природного и попутного нефтяного газа с извлечением отдельных углеводородов [2]. Следует отметить, что в разрабатываемых технических решениях по оптимизации технологических режимов БПГ [2-4] состав оборудования УОГ, как правило, невариантный, а режимы его эксплуатации не учитывают динамику жизненного цикла предприятия.

Требования к структуре и режимам эксплуатации УОГ КС МГ (рис. 1б, 1в) определяются температурным (тепловым) режимом газопровода, который наряду с другими факторами существенно влияет на энергозатраты при трубопроводном транспорте газа [5-9]. При повышении температуры газа на входе линейных участков (ЛУ) МГ увеличиваются температура газа в конце ЛУ трубопровода и средняя на ЛУ температура газа. При этом параметры КС в конце данного ЛУ и МГ в целом изменяются следующим образом:

- снижается давление газа на входе в нагнетатели КС, что приводит (при поддержании на данной КС постоянного давления газа после компримирования) к повышению степени сжатия компрессоров и соответствующему увеличению мощности нагнетателей;
- увеличиваются затраты на ремонт МГ вследствие таяния грунта для северных регионов;
- уменьшается пропускная способность МГ.

Транспортировка газа по МГ в районах с многолетней мерзлотой требует также решения проблемы дополнительного охлаждения газа до минус 2-3°С не только в аппаратах воздушного охлаждения (АВО), но и в теплообменниках, охлаждаемых специальным хладоносителем или хладагентом, вырабатываемым на холодильной станции.



аппараты: 1 – центробежный агрегат с электроприводом; 2 – конденсатор (АВО); 3 – терморегулирующий вентиль; 4 – испаритель; 5 – детандер-генератор; 6 – воздушный компрессор; 7 – газовая турбина; 8 – камера сгорания; 9 – газовый компрессор (нагнетатель); 10 – АВО газа; 11 – холодильная станция; 12 – испаритель-охладитель магистрального газа; 13 – дроссель; 14 – электропривод
технологические потоки: I, II, III, IV – газ: сырьевой, на установку НТС, на входе, выходе КС;
V – воздух атмосферный; VI – выхлопные (дымовые) газы

Рис. 1. Принципиальные схемы УОГ объектов: а – БПГ с НТС; б, в – КС МГ

Анализ выполненных исследований [2, 3, 6, 9-11, 17] показал, что вопросы разработки оптимальных схем УОГ в составе БПГ и КС МГ, режимов работы во взаимосвязи с динамикой параметров и характеристик технологического процесса добычи газа в течение жизненного цикла объектов в достаточной степени не ставились и не прорабатывались.

Для выбора рациональных структуры и режимов эксплуатации УОГ на конкретном предприятии разработаны методики и моделирующие алгоритмы расчета альтернативных вариантов схемных и параметрических решений [12]. Программно-методическое обеспечение [13-16] интегрировано в информационно-аналитическую систему управления потреблением энергоресурсов. Концепция выбора состава оборудования и параметров УОГ БПГ и КС МГ, учитывающая характеристики региона расположения объекта и динамику развития газового месторождения, базируется на принципах си-

стемного подхода и методологии проектирования сложных систем SADT (Structured Analysis and Design Technique) [10, 11], а также методах оценки производственных показателей БПГ [17].

Общий вид экономико-математической модели объекта представлен суммой двух конкурирующих факторов: затрат на выработку охлаждающей среды и технолого-экологических затрат в БПГ или КС МГ для расчетного и переменных режимов работы. Расчетный режим (индекс p) включает совокупность параметров ОУГ, формирующих изменяющуюся часть капитальных затрат в рассматриваемой системе. Переменные режимы (индекс j) учитывают изменение параметров технологического процесса и окружающей среды за рассчитываемый период времени T .

Для проектируемых и реконструируемых объектов критерием оптимальности принимаемых решений является суммарный интегральный эффект или чистый дисконтированный доход

$$ЧДД = \sum_{t=0}^T (R_t - Z_t)(1 + E)^{-t} \xrightarrow{X \rightarrow opt} \max, \quad (1)$$

где R_t , Z_t – результаты, достигаемые на t -м шаге и затраты на том же шаге; E – норматив приведения затрат и эффектов к единому времени; X – оптимизирующий параметр.

В качестве критерия оптимальности для УОГ действующих объектов при условии постоянства R , приняты эксплуатационные затраты Z в течение расчетного периода времени

$$Z = \sum_{j=1}^m (Z_j^{yog} + Z_j^T + Z_j^Э) t_j + K_p^{yog} (\alpha_{ao} + \alpha_{ин}) \xrightarrow{X \rightarrow opt} \min, \quad (2)$$

где Z_j^{yog} , Z_j^T , $Z_j^Э$ – соответственно, затраты в УОГ, технологическом процессе и эквивалентная экономическая оценка экологического ущерба в j -м режиме; m – число переменных режимов; t_j – время эксплуатации в j -м режиме; K_p^{yog} – капитальные затраты в оборудование УОГ и БПГ или КС МГ; α_{ao} , $\alpha_{ин}$ – коэффициенты годовых отчислений от инвестиций на амортизацию, ремонт оборудования и учета условий инвестирования проекта и строительства объекта.

Рассмотрим результаты оптимизации УОГ с использованием критериев (1) и (2) на примере установки транспорта природного газа Заполярного газонефтеконденсатного месторождения (ЗНГКМ).

Оптимизация структуры УОГ (рис. 1б, в) выполнена для следующих альтернативных вариантов охлаждения газа:

1. АВО только в зимнее время с подачей газа в МГ при начальной температуре без охлаждения в летних режимах с температурами воздуха, превышающими расчетное значение $-7,5^\circ\text{C}$ или $-2,5^\circ\text{C}$.

2. АВО в зимнее время с расчетной температурой воздуха $-7,5^\circ\text{C}$ и ниже; в летнее время – охлаждение газа при непосредственном испарении хладагента, вырабатываемого на компрессионной холодильной станции (КХС) с приводом от газотурбинной установки (принят турбоагрегат АТКА 545-6000, работающий с конденсаторами воздушного охлаждения).

3. Аналогично варианту 2, но в оборудование КХС включен компрессор с электроприводом.

В оптимизационных расчетах учтено повышение начальной температуры газа на входе в УОГ в зависимости от года разработки ЗНГКМ.

Охлаждение газа после конечной ступени сжатия осуществляется в аппаратах типа 2АВГ-75 (площадь поверхности охлаждения одного аппарата 9930 м^2), что предотвращает возможное размораживание грунтов в условиях Крайнего Севера, а также улучшает работу установок комплексной переработки газа – очистку, осушку, сепарацию. Расход газа составляет 676 кг/с , конечная его температура ограничена 271 К . Начальная температура газа на входе в АВО повышается по мере разработки ЗНГКМ. Соответственно увеличивается количество устанавливаемых АВО, оптимизация суммарной площади поверхности которых выполнена по критерию (1). Рассмотрен вариант с электроприводом газового нагнетателя (рис. 1в). С учетом характеристик переменных режимов, уравнений теплообмена и гидродинамики потоков воздуха и газа, зависимостей для мощностей вентилятора и нагнетателя, ограничений на параметры процессов получено уравнение для оптимальной площади поверхности АВО.

$$F_{\text{АВО}}^{\text{опт}} = \frac{U_{\text{Э}}^I \sum_{j=1}^m (\omega N_{\text{В}j} + 2N_{\text{Н}j}) t_j + U_{\text{Э}}^{II} (\omega N_{\text{В}p} + 2N_{\text{Н}p}) + 2dK_{\text{Н}}^{yA} N_{\text{Н}p} (\alpha_{\text{аоН}} + \alpha_{\text{ин}})}{K_{\text{АВО}}^{\text{уд}} (b - cn) (\alpha_{\text{аоАВО}} + \alpha_{\text{ин}}) + \sum_{j=1}^m t_j \left(\frac{\partial Z_j^T}{\partial T_{Tj}} + \frac{\partial Z_j^Э}{\partial T_{Tj}} \right) \frac{\partial T_{Tj}}{\partial F_{\text{АВО}}}}, \quad (3)$$

где $C_{\text{э}}^I, C_{\text{э}}^{\text{II}}$ – цена электроэнергии, руб./кВт·ч, и плата за установленную мощность электропотребляющего оборудования, руб./кВт·год; $N_{\text{Вж}}, N_{\text{Вр}}, N_{\text{Нж}}, N_{\text{Нр}}$ – мощность вентиляторов АВО и нагнетателей газа в соответствующих режимах, кВт; ω – коэффициент, зависящий от расположения труб и длительности эксплуатации АВО; $K_{\text{АВО}}^{\text{уд}}, K_{\text{Н}}^{\text{уд}}$ – удельная стоимость АВО, руб./м², и нагнетателей, руб./кВт; n – число рядов труб АВО по ходу воздуха в вертикальном ряду; $T_{\text{г}}$ – температура охлаждения газа в УОГ, К; b, c, d – коэффициенты и показатель степени в аппроксимационных зависимостях стоимостных характеристик оборудования.

Технологические потери Z_j^T при изменении эксплуатационных режимов охлаждения связаны с уменьшением пропускной способности МГ

$$Z_j^T = C_{\text{Г}} \Delta V_{\text{Г}}, \tag{4}$$

где $C_{\text{Г}}$ – цена природного газа, руб./м³; $\Delta V_{\text{Г}}$ – потери газа в j -м режиме, м³/год.

Полученные уравнения (3) и (4) позволяют осуществлять проектирование объектов в условиях неопределенной исходной информации с учетом динамики эксплуатационных режимов, цен на энергоносители и оборудование и перспективных данных о производительности и других параметрах технологических процессов УОГ КС МГ.

В табл. 1 приведены результаты оптимизации площади поверхности АВО с использованием моделирующих программ [13-16] для десятилетнего периода эксплуатации ЗНГКМ. Относительное увеличение технологических потерь приведено к условиям эксплуатации 1-го года.

Таблица 1

Показатели УОГ по годам разработки ЗНГКМ*

Показатель, единица измерения	Год разработки					
	1	2	3	5	6	10
Средняя температура газа на входе, °С	3,8	5,3	6,3	8,0	9,4	11,5
Число АВО типа 2 АВГ-75	$\frac{18}{7}$	$\frac{21}{9}$	$\frac{22}{10}$	$\frac{24}{11}$	$\frac{25}{12}$	$\frac{26}{14}$
Относительное увеличение технологических потерь, %	$\frac{—}{26,8}$	$\frac{30,5}{65,5}$	$\frac{50,7}{91,2}$	$\frac{84,6}{134,2}$	$\frac{112,3}{169,2}$	$\frac{153,0}{221,1}$

*в числителе данные для расчетной температуры воздуха –2,5°С, в знаменателе – для –7,5°С.

На рис. 2 представлена зависимость относительных капитальных затрат $\overline{K}_p^{\text{УОГ}}$ трех вариантов УОГ от температурного режима добычи газа (года разработки ЗНГКМ) в сопоставимых климатических условиях при расчетной температуре окружающего воздуха для АВО –7,5°С, а в табл. 2 – результаты расчета эксплуатационных затрат (2) для этих же вариантов.

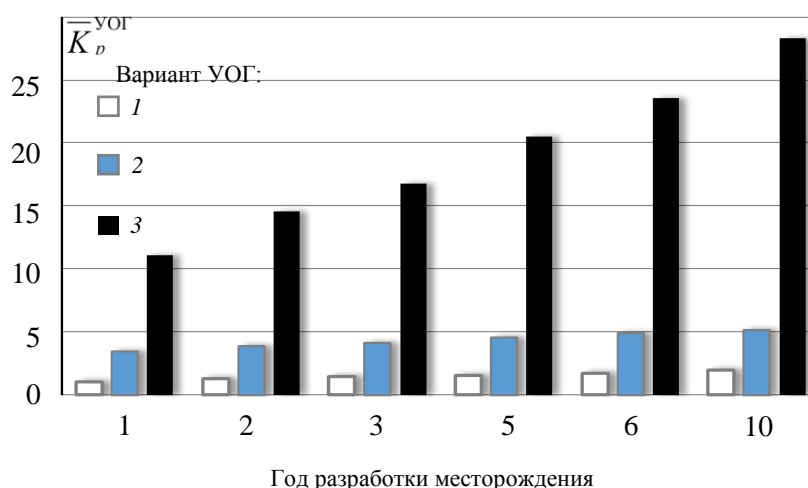


Рис. 2. Относительные капитальные затраты в УОГ по годам разработки ЗНГКМ

Анализ приведенных данных показывает, что несмотря на существенные капитальные затраты вариант 2 – УОГ с пиковой КХС и приводом холодильного компрессора от газовой турбины, по критерию эксплуатационных затрат, которые практически одинаковы для расчетных температур воздуха –2,5 и –7,5°С, является экономически более выгодным. Немногим более дорогим является также

вариант 3 с электроприводным компрессором КХС. Охлаждение транспортируемого газа только в АВО экономически нерационально, поскольку приводит к существенному росту эксплуатационных издержек, связанных с недоохлаждением газа, начиная с третьего года разработки ЗНГКМ.

Таблица 2

Относительные эксплуатационные затраты в вариантах УОГ по годам разработки ЗНГКМ*

Вариант	Год разработки					
	1	2	3	5	6	10
1	<u>1,0</u>	<u>1,3</u>	<u>1,5</u>	<u>1,8</u>	<u>2,0</u>	<u>2,3</u>
	1,1	1,4	1,6	1,9	2,3	2,7
2	<u>0,78</u>	<u>1,01</u>	<u>1,17</u>	<u>1,42</u>	<u>1,63</u>	<u>1,96</u>
	0,77	1,01	1,17	1,43	1,64	1,97
3	<u>0,85</u>	<u>1,12</u>	<u>1,29</u>	<u>1,58</u>	<u>1,82</u>	<u>2,17</u>
	0,88	1,16	1,33	1,63	1,87	2,25

*данные в числителе для расчетной температуры воздуха $-2,5^{\circ}\text{C}$, в знаменателе – для $-7,5^{\circ}\text{C}$

Вывод. Разработанная методика оптимизации состава оборудования и режимов эксплуатации установок охлаждения газа с учетом динамических характеристик технологического процесса добычи и климатических условий региона позволяет выполнить проектирование объектов подготовки и транспортировки газа с оптимальными технико-экономическими параметрами на всех этапах их развития.

Работа выполнена в рамках государственного задания при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энциклопедия газовой промышленности / пер. с франц.; ред. пер. К.С. Басниев. 4-е изд. М.: Акционерное общество «ТВАНТ», 1994. 884 с.
2. Буклатов А.Н. Технологии низкотемпературной конденсации при глубокой переработке попутного нефтяного газа / А.Н. Буклатов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2008. № 2. С. 12-15.
3. Подбор оптимальных режимов работы установок комплексной подготовки газа / С.С. Иванов, М.Ю. Тарасов, А.А. Зюбин, В.Ю. Жиряков, Е.Л. Мартынов // Газовая промышленность. 2014. № 2. С. 100-103.
4. Бекиров Т.М. Промысловая и заводская обработка природных газов / Т.М. Бекиров. М.: Недра, 1980. 293 с.
5. Шпотаковский М.М. Энергосбережение при трубопроводном транспорте природного газа / М.М. Шпотаковский // Газовая промышленность. 2001. № 3. С. 28-30.
6. Снижение энергозатрат на охлаждение природного газа в АВО КС / О.Е. Аксютин, А.А. Пятибрат, С.В. Кубаров, А.К. Прохонов // Газовая промышленность. 2009. № 2. С. 74-76.
7. Современные АВО газа – ресурс энергосбережения в газовой отрасли / А.З. Шайхутдинов, В.А. Лифанов, В.А. Маланичев // Газовая промышленность. 2010. № 9. С. 40-41.
8. Давлетов К.М. Научно-практические основы технологии и техники охлаждения природного газа при его подготовке к транспорту на месторождениях Крайнего Севера: дис. ... д-ра техн. наук / К.М. Давлетов. М., 2007. 377 с.
9. Сердобинцев С.П. Совершенствование систем подготовки и охлаждения природного газа на газоперекачивающей станции / С.П. Сердобинцев, С.В. Сальников // Автоматизация и современные технологии. 2009. № 3. С. 26-30.
10. Цвиркун А.Д.. Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем (оптимизационно-имитационный подход) / А.Д. Цвиркун, В.К. Акинфиев, В.А. Филиппов. М.: Наука, 1985. 173 с.
11. Марка Д.А. Методология структурного анализа и проектирования: пер. с англ. / Д.А. Марка, К.Л. МакГоуэн. М.: Мета Технология, 1993. 240 с.
12. Долотовский И.В. Системный анализ энергетического комплекса предприятий подготовки и переработки газа / И.В. Долотовский, Е.А. Ларин, Н.В. Долотовская. Саратов: Буква, 2014. 326 с.
13. Программный комплекс «Аппараты воздушного охлаждения»: программа для ЭВМ № 2012613267 / И.В. Долотовский, А.В. Ленкова, Н.В. Долотовская. 06.04.12.

14. Свойства газа природного: программа для ЭВМ № 2014613737 / И.В. Долотовский. 04.04.14.
15. Теплофизические свойства газа (ГСССД 81-84): программа для ЭВМ № 2014619488 / И.В. Долотовский, Н.В. Долотовская. 17.09.14.
16. Система «Энергоресурс»: программа для ЭВМ № 2010615353 / Е.А. Ларин, И.В. Долотовский, Н.В. Долотовская. 20.08.10.
17. Tonchev, A. Single index measures operational performance hydrocarbon facilities / A. Tonchev, C. Tonchev // Oil & Gas Journal. Oct. 10. 2005. P. 56-64.

Долотовский Игорь Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Теплоэнергетика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Igor V. Dolotovsky – Ph.D., Senior Research Fellow, Department of Thermal Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Ларин Евгений Александрович – кандидат технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Eugeniy A. Larin – Ph.D., Professor Department of Thermal Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Долотовская Надежда Васильевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная теплотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Nadezhda V. Dolotovskaya – Ph.D., Associate Professor Department of Industrial Heat Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20.12.15, принята к опубликованию 11.05.15

УДК 621.365

К.Н. Огурцов, Т.Ю. Дунаева

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С КАМЕРАМИ ЛУЧЕВОГО ТИПА ПУТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКАМИ ВНУТРЕННЕГО ТЕПЛА В ОБЪЕКТЕ

Представлены способы повышения энергетической эффективности СВЧ электротермических установок с камерами лучевого типа путем повышения равномерности нагрева и управления внутренними источниками тепла в объекте.

Энергетическая эффективность, СВЧ электротермическая установка, камера лучевого типа, внутренние источники тепла, математическое моделирование

K.N. Ogurtsov, T.Yu. Dunaeva

INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF MICROWAVE ELECTROTHERMAL APPLIANCES WITH BEAM-TYPE CAMERAS BY CONTROLLING INTERNAL HEAT SOURCES

The paper presents the techniques applied for improving the energy efficiency of microwave electrothermal appliances with beam-type cameras by upgrading the uniformity of heating and controlling internal heat sources of the units.

Energy efficiency, microwave electro thermal appliance, beam-type camera, internal heating sources, mathematical simulation

Актуальной проблемой промышленного производства в настоящее время является повышение энергетической эффективности термообработки диэлектриков. Существующие традиционные методы термообработки диэлектриков являются достаточно энергозатратными. Доказано, что в некоторых отраслях промышленности СВЧ диэлектрический нагрев успешно конкурирует с традиционными видами энергоподвода, позволяя значи-

тельно снизить энергопотребление и улучшить качество выпускаемой продукции, повышая тем самым ее конкурентоспособность [1, 2]. Основным преимуществом СВЧ нагрева диэлектриков перед альтернативными способами энергоподвода, позволяющим значительно сократить энергозатраты, является достаточно быстрый равномерный нагрев диэлектриков за счет наличия внутренних источников тепла непосредственно в нагреваемом объекте. Так, например, в СВЧ установках с КБВ на нерегулярном волноводе равномерность распределения внутренних источников тепла обеспечивается подбором геометрии камеры. В КСВ применяют диссекторы и вращение обрабатываемого объекта, а также регулирование влажности воздуха в рабочей камере. В камерах лучевого типа улучшения равномерности термообработки объекта можно достичь, используя многогенераторные камеры, а также специальные отражающие поверхности [3]. Равномерность термообработки, как правило, оценивается в процентном соотношении и достигает, например, 5 % в КБВ. Одним из основных требований технологического процесса является не только высокая равномерность распределения температуры в нагреваемом объекте, но и строгое соблюдение темпов нагрева/остывания, а также точность поддержания температуры в объекте. Основным способом решения данной проблемы в СВЧ электротермических установках является двухпозиционное регулирование, при котором количество энергии, подводимой к нагреваемому объекту, регулируется путем изменения скважности работы магнетрона. Другой способ регулирования подачи СВЧ мощности в рабочую камеру – использование магнетрона с регулируемым током анода.

Как известно, при СВЧ термообработке количество выделяемой энергии в глубине нагреваемого объекта (при условии, что размеры объекта соизмеримы с длиной волны) зачастую больше, чем на поверхности. В таких случаях можно говорить о недостаточном нагреве поверхности объекта. Это снижает равномерность нагрева объекта и повышает энергетические затраты на технологический процесс. Решить эту проблему можно, управляя распределением внутренних источников тепла в нагреваемом объекте.

Рассмотрим эту проблему на примере нагрева плоского объекта в поле рупорного излучателя (рис. 1), расположенного в КЛТ. Математическая постановка этой задачи подробно рассмотрена в [3, 4]. На некотором расстоянии от объекта располагается металлическая стенка. В результате отражений от границ воздух-среда и металл-воздух образуется стоячая волна, распределение напряженности которой в зависимости от расстояния от излучателя показано на рис. 2.

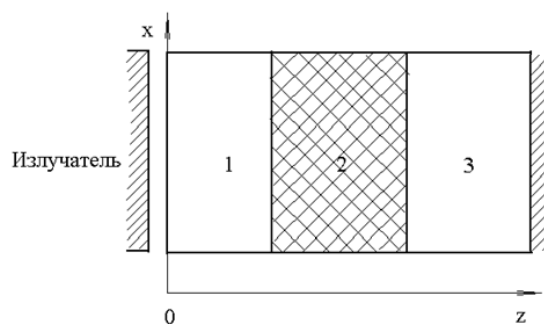


Рис. 1. Распространение электромагнитной волны в многослойной среде: 1, 3 – воздух, 2 – обрабатываемый объект

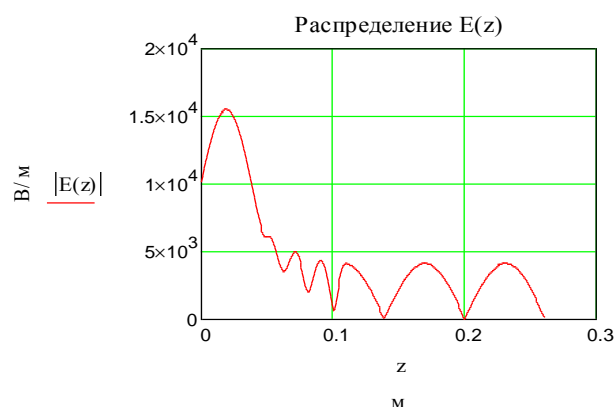


Рис. 2. Распределение напряженности электромагнитного поля внутри объекта

В диэлектрике с потерями при этом возникают внутренние источники тепла, мощность которых определяется по формуле

$$q_v = 0,5\omega\varepsilon_0\varepsilon' \operatorname{tg} \delta |\vec{E}|^2 ; \quad (1)$$

при этом распределение мощности источников тепла по толщине нагреваемого объекта имеет характер, показанный на рис. 3.

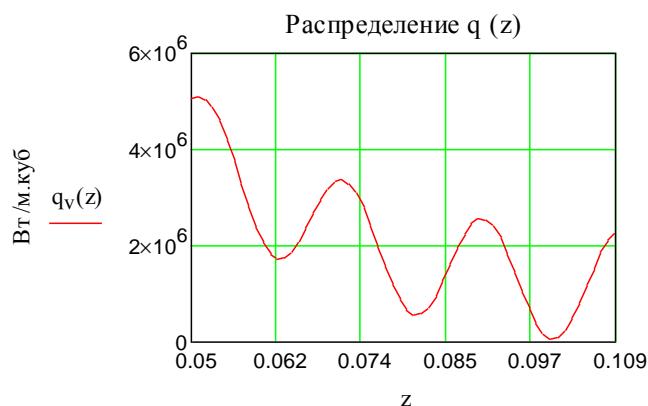


Рис. 3. Распределение мощности внутренних источников тепла по толщине диэлектрика

Изменяя расстояние от нагреваемого объекта до металлической отражающей стенки, можно менять распределение внутренних источников тепла, а следовательно, увеличить равномерность нагрева. Диапазон изменения тепловыделения при этом будет равен половине длины волны. Наибольшая разница в распределении внутренних источников тепла будет наблюдаться при расстояниях от отражателя, кратных $\frac{\lambda}{4}$, где λ – длина волны в пространстве между диэлектриком и отражателем. На рис. 4 представлено распределение внутренних источников тепла при расстоянии до отражателя на $\frac{\lambda}{4}$ больше, чем на рис. 3.

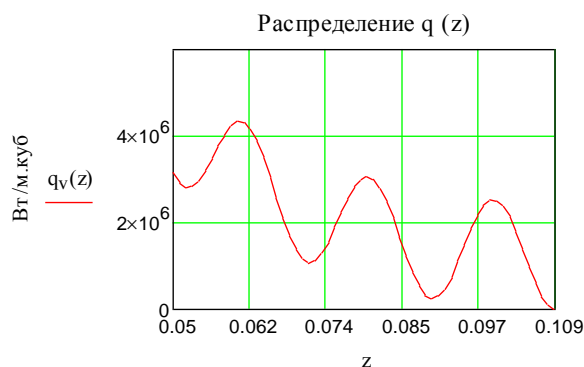


Рис. 4. Распределение мощности внутренних источников тепла по толщине диэлектрика при увеличенном расстоянии до отражателя на $\frac{\lambda}{4}$

Таким образом, при конструировании СВЧ электротермических установок лучевого типа возможно осуществить управление внутренними источниками тепловыделения. На рис. 4 представлен вариант конструкции рабочей камеры периодического действия с плавной регулировкой расстояния до металлического отражателя. В качестве механизма перемещения объекта в данном случае используется гидропривод.

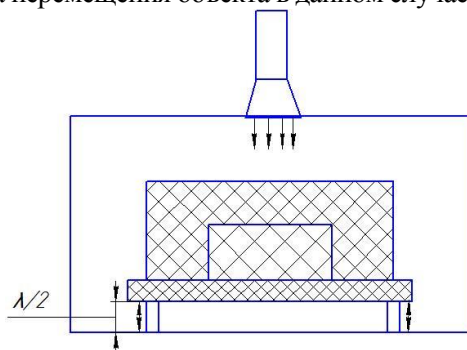


Рис. 4. Камера лучевого типа с изменяющимся расстоянием до отражающей поверхности (периодический режим работы)

При конструировании рабочей камеры лучевого типа, работающей в методическом режиме, можно использовать несколько излучающих систем с разными расстояниями от объекта до отражателя (рис. 5).

Для обеспечения симметрии теплового распределения СВЧ энергия подается к объекту с двух сторон, отражатели расположены на разных расстояниях от нагреваемого объекта на расстоянии $\frac{\lambda}{4}$ друг от друга.

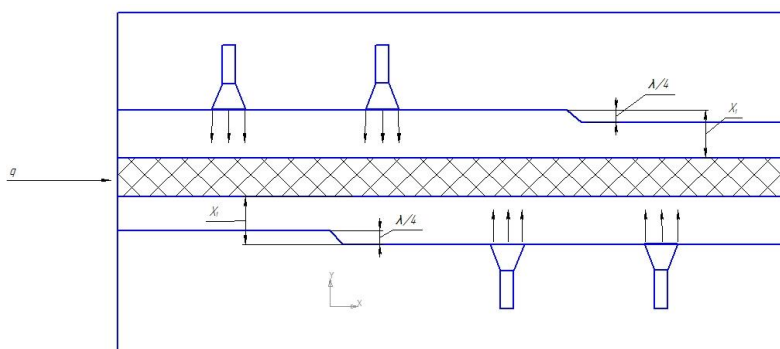


Рис. 5. Камера лучевого типа с четырьмя излучающими антеннами и разными расстояниями от обрабатываемого объекта до отражающей поверхности (методический режим работы)

При разработке рабочих камер лучевого типа с регулируемыми источниками тепловыделения в первую очередь необходимо рассчитать начальное расстояние от объекта до отражающей плоскости. На наш взгляд, это расстояние должно быть выбрано таким образом, чтоб максимум тепловыделения приходился на поверхностные слои диэлектрика. Это позволит скомпенсировать тепловые потери в окружающую среду и, в конечном счете, увеличить равномерность нагрева. При этом это расстояние следует минимизировать для уменьшения металлоемкости конструкции и размеров рабочей камеры.

Вывод. Повышения энергетической эффективности термообработки диэлектриков в СВЧ электромагнитном поле возможно достичь путем увеличения равномерности тепловыделения. Для этого предлагается в установках с камерами лучевого типа предусматривать возможность плавного регулирования расстояния от объекта до отражающей стенки, а также от излучателей до объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Огурцов К.Н. Использование СВЧ диэлектрического нагрева для высокотемпературной обработки материалов [Электронный ресурс] / К.Н. Огурцов, Т.Ю. Дунаева // Материалы XV Международной зимней школы-семинара по электронике сверхвысоких частот и радиофизике: тез. лекций и докл., г. Саратов, 6-11 февр. 2012 г. / СГУ. Саратов, 2012.
2. Дунаева Т.Ю. Техничко-экономическое сравнение СВЧ- и тепловых сушилок зерна / Т.Ю. Дунаева, Ю.С. Архангельский // Радиотехника и связь: сб. науч. тр. / СГТУ. Саратов, 2008. С. 274-278.
3. Архангельский Ю.С. Камеры лучевого типа СВЧ электротехнологических установок / Ю.С. Архангельский, К.Н. Огурцов, Е.М. Гришина. Саратов: Изд. дом «Полиграфия Поволжья», 2010. 229 с.
4. Огурцов К.Н. СВЧ рабочие камеры для высокотемпературного нагрева диэлектриков / К.Н. Огурцов // Вопросы электротехнологии. 2013. № 1. С. 40-45.

Огурцов Константин Николаевич – кандидат технических наук, докторант, доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Дунаева Татьяна Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Constantin N. Ogurtsov – Ph.D., Associate Professor
Department of Automated Electrical and Technological Units and Systems,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Tatyana Yu. Dunaeva – Ph.D., Associate Professor
Department of Automated Electrical and Technological Units and Systems,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Правила оформления и представления статей

1. Статья, направляемая в редакцию журнала «Вестник СГТУ», должна быть тщательно отредактирована и представлена в электронном виде в формате текстового редактора «MS Word 2007» (параметры страницы – А4; поля – 2,0 см; ориентация книжная; шрифт Times New Roman, высота 12; межстрочный интервал – 1,0). Текст статьи представляют в редакцию по электронной почте vestnik@sstu.ru.

2. Статья должна содержать краткий обзор проблемы, из которого следует постановка задачи, обосновывать актуальность темы, отражать теоретические и (или) экспериментальные результаты и содержать четкие выводы, свидетельствующие о новизне полученных результатов.

3. В начале статьи в левом верхнем углу ставится индекс УДК. Далее на первой странице данные идут в такой последовательности:

- инициалы и фамилии авторов,
- полное название статьи (шрифт жирный, буквы прописные),
- краткая (5-7 строк) аннотация (курсив),
- ключевые слова.

Далее авторы, название статьи, аннотация и ключевые слова повторяются на английском языке.

Затем идет текст самой статьи и список литературы.

Статья завершается сведениями об авторах: ф.и.о. (полностью), ученая степень, ученое звание, место работы (полностью), должность, контактные телефоны. Сведения об авторах также повторяются на английском языке.

4. Объем статьи не должен превышать 10 страниц текста, содержать не более 5 рисунков или фотографий; объем обзора – 25 страниц, 10 рисунков; объем краткого сообщения – не более 3 страниц, 2 рисунков.

Иллюстрации (рисунки, графики) должны быть расположены в тексте статьи и выполнены в одном из графических редакторов (формат tif, pcc, jpg, pcd, msp, dib, cdr, cgm, eps, wmf). Допускается также создание и представление графиков при помощи табличных процессоров «Excel», «Quattro Pro», «MS Graph». Каждый рисунок должен иметь номер и подпись. Рисунки и фотографии должны иметь контрастное изображение.

Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

5. Формулы и буквенные обозначения величин должны быть набраны в редакторе формул **Microsoft Equation 3.0**. Каждая формула должна иметь номер.

6. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т.е., и т.д., и т.п.). Допускается введение предварительно расшифрованных сокращений.

7. Список литературы должен быть оформлен по ГОСТ 7.0.5-2008 и включать: фамилию и инициалы автора, название статьи, название журнала, том, год, номер или выпуск, страницы, а для книг – фамилии и инициалы авторов, точное название книги, место издания (город), издательство, год издания, количество страниц.

8. К статье прилагается экспертное заключение.

9. Рукопись статьи рецензируется ведущим ученым в данной области, как правило, доктором наук.

10. Электронная версия опубликованной статьи размещается в системе РИНЦ.

11. Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

12. Статьи, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются, рукописи и электронные носители авторам не возвращаются. Датой поступления рукописи считается день получения редакцией окончательного текста. В случае отказа в публикации статьи редакция направляет автору мотивированный отказ.

13. Для публикации и своевременной подготовки журнала необходимо заполнить регистрационную карту участника, представляемую отдельным файлом. Высылается вместе с рукописью.

14. Плата с аспирантов за публикацию статьи не взимается.

Вестник Саратовского государственного технического университета

– рецензируемое научное периодическое издание по 2 отраслям науки (01.00.00 – Физико-математические науки, 05.00.00 – Технические науки), охватывающих по совокупности 5 групп специальностей (01.02.00 – Механика, 01.04.00 – Физика, 05.02.00 – Машиностроение и машиноведение, 05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление, 05.14.00 – Энергетика).

Журнал имеет следующие, соответствующие указанным группам специальностей, разделы содержания:

- Математика и механика
- Физика
- Машиностроение и машиноведение
- Информационные технологии
- Энергетика

Журнал публикует статьи только по данным группам специальностей!

<u>Регистрационная карта публикующегося в журнале «Вестник СГТУ»</u>		
Фамилия	Имя	Отчество
Полное название статьи		
Ученая степень	Ученое звание	Должность с указанием кафедры, отдела, лаборатории
Электронная почта	Служебный телефон/факс	Домашний адрес и телефон
Наименование направляющей статью организации		
Группа специальностей, к которой относится статья		