

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**



ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,
МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

январь–февраль 2010

№ 1(65)



ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

д.т.н., профессор В.О. Никифоров

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.т.н., профессор А.А. Бобцов, д.т.н. А.В. Бухановский,
д.т.н., профессор В.А. Валетов, д.ф.-м.н., ст.н.с. Т.А. Вартамян,
д.т.н. М.А. Ган, д.т.н., профессор Ю.А. Гатчин, д.т.н., профессор А.В. Демин,
к.т.н., доцент Н.С. Кармановский (заместитель главного редактора),
д.ф.-м.н., профессор Ю.Л. Колесников, д.ф.-м.н., профессор С.А. Козлов,
д.т.н., профессор А.Г. Коробейников, д.т.н., профессор В.В. Курейчик,
д.т.н., доцент Л.С. Лисицына, к.т.н., доцент В.Г. Мельников,
д.т.н., профессор Ю.И. Нечаев, д.т.н., профессор Н.В. Никоноров,
д.т.н., профессор А.А. Ожиганов, д.ф.-м.н., ст.н.с. Е.Ю. Перлин,
д.т.н., профессор И.Г. Сидоркина, д.т.н. О.А. Степанов,
д.т.н., профессор В.Л. Ткалич, д.т.н., профессор А.А. Шалыто,
д.т.н., профессор Ю.Г. Якушенков

Секретарь – Г.О. Артемова

Редактор – к.т.н., ст.н.с. Н.Ф. Гусарова

Перевод Н.Г. Лещикова

Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, СПбГУ ИТМО,
комн. 330

Телефон / факс (812) 233 45 51

<http://books.ifmo.ru/ntv>

E-mail:karmanov@mail.ifmo.ru

| | |
|--|------------|
| 1. ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ. ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ..... | 5 |
| Богатырева В.В. Оптические измерения в неинерциальных системах отсчета..... | 5 |
| Мешковский И.К., Стригалева В.Е., Тараканов С.А. Закрытая схема обработки сигнала в волоконно-оптическом датчике тока | 10 |
| Артемьев В.В., Белов Н.П., Коротаев В.В., Смирнов А.В., Яськов А.Д. Оптико-электронный измеритель скорости с адаптивной компенсацией помех | 16 |
| Пруненко Е.К. Исследование спектральных свойств красителей и поверхностно окрашенных полимерных линз | 22 |
| 2. ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ..... | 27 |
| Сачков Д. Ю. Особенности непрерывной генерации трехмикронного Er:YLF-лазера при селективной накачке на нижний (${}^4I_{13/2}$) и верхний (${}^4I_{11/2}$) лазерные уровни | 27 |
| 3. КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.. | 34 |
| Богатырев В.А., Котельникова Е.Ю. Анализ влияния накопления отказов коммуникационных средств на снижение коммуникационных возможностей компьютерных систем с резервированием | 34 |
| Короновский А.А., Косицын А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. Численное моделирование переходных процессов в эволюционирующих по генетическим алгоритмам сетях | 40 |
| Пиуновский Е.В., Тропченко А.А. Современные технологии сжатия аудиосигналов..... | 46 |
| Гольдштейн С.Л., Малышева Е.Н. Пакет полуформализованных моделей мобильного телемедицинского комплекса | 53 |
| 4. МЕХАНИКА И МЕХАТРОНИКА | 59 |
| Мельников В.Г. Энергетический метод параметрической идентификации тензоров инерции тел..... | 59 |
| Сергушин П.А. Модель Ланчестера и динамика спирально-анизотропных стержней..... | 63 |
| Буслаева М.М. Разработка осциллятора малых угловых колебаний | 68 |
| 5. ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА | 75 |
| Слободов А.А., Сочагин А.А., Качер Е.Б., Кремнев Д.В., Радин М.А. Обеспечение информационной достоверности и согласованности термодинамических функций и баз данных..... | 75 |
| Кямря А.Р., Серебрянникова Н.В., Залеская А.А. Энергоаудит коттеджей и других объектов малоэтажного строительства методом тепловизионного контроля и контактных измерений тепловых потоков | 81 |
| 6. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ..... | 87 |
| Данилов А.А. Способы построения трехмерных поверхностных триангуляций и тетраэдральных сеток | 87 |
| Кустарев П.В., Ключев А.О. Маршруты проектирования «систем на кристалле» | 93 |
| 7. МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ..... | 101 |
| Арустамов С.А., Гатчин Ю.А., Липатов А.Л., Григорьева А.С. Обеспечение безопасности информационных систем на основе анализа деревьев атак..... | 101 |
| 8. ЭКОНОМИКА И ФИНАНСЫ. МЕНЕДЖМЕНТ..... | 108 |
| Оленёв Н.Н., Фетинина А.И. Моделирование экономики Кировской области с применением технологий параллельного программирования..... | 108 |
| Сабина А.Л., Терехова М.Д. К вопросу об оценке потенциальной конкурентоспособности продукции предприятий оборонно-промышленного комплекса России..... | 114 |
| SUMMARY..... | 119 |

| | |
|---|------------|
| 1. OPTICAL AND OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS. OPTICAL TECHNOLOGIES | 5 |
| V. Bogatyreva. Optical measuring in noninertial frames of reference | 5 |
| I. Meshkovskiy, V. Strigalev, S. Tarakanov. The closed signal processing scheme in the fiber-optic current sensor | 10 |
| V. Artemiev, N. Belov, V. Korotaev, A. Smirnov, A. Yaskov. Optical-electronic velocimeter with invariant noise immunity characteristics..... | 16 |
| E. Prunenko. Spectral properties investigation of dyes and superficially painted polymeric lenses..... | 22 |
| 2. LASER TECHNOLOGIES..... | 27 |
| D. Sachkov. Peculiarities of continuous wave generation of Er:YLF-laser with selective pumping on terminate ($^4I_{13/2}$) and initial ($^4I_{11/2}$) laser levels | 27 |
| 3. COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES..... | 34 |
| V. Bogatyrev, E. Kotelnikova. Analysis of failures accumulation influence of communication tools at decline of redundant computer operating systems communication possibilities..... | 34 |
| A. Koronovskiy, A. Kositsin, O. Moskalenko, A. Khramov. Numerical simulation of transient processes in complex networks evolving by genetic algorithms | 40 |
| E. Piunovskiy, A. Tropchenko. Modern technologies of audio signals compression | 46 |
| S. Goldshtein, E. Malysheva. Half formalized models package of a mobile telemedical complex | 53 |
| 4. MECHANICS AND MECHATRONICS..... | 59 |
| V. Melnikov. An energy method for parametrical identification of object inertia tensors | 59 |
| P. Sergushin. Lanchester model and damped helical anisotropy rods dynamics..... | 63 |
| M. Buslaeva. The development of small angular fluctuations oscillator | 68 |
| 5. THERMAL PHYSICS AND THEORETICAL HEAT ENGINEERING | 75 |
| A. Slobodov, A. Sochagin, E. Kacher, D. Kremnev, M. Radin. Information reliability and consistency support of thermodynamic functions and databases | 75 |
| A. Kyamyarya, N. Serebryannikova, A. Zaleskaya. Power audit of cottages and other low building objects by thermal imaging control method and contact measurements of thermal streams | 81 |
| 6. COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS | 87 |
| A. Danilov. Tetrahedral and surface triangular mesh generation techniques..... | 87 |
| P. Kustarev, A. Klyuchev. Design flows in CAD “systems-on-chip” | 93 |
| 7. INFORMATION SECURITY METHODS AND SYSTEMS | 101 |
| S. Arustamov, Yu. Gatchin, A. Lipatov, A. Grigorieva. Information systems security coverage based on attack tree analysis | 101 |
| 8. ECONOMICS AND FINANCES. MANAGEMENT | 108 |
| N. Olenyov, A. Fetinina. Modeling of Kirov region economy by parallel programming technologies..... | 108 |
| A. Sabinina, M. Terekhova. Valuation of potential competitiveness of the Russian war industry products | 114 |
| SUMMARY..... | 119 |

УДК 535.312.3

**ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ
В НЕИНЕРЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ОТСЧЕТА**

В.В. Богатырева

Предлагаются новые способы измерения параметров ускоренного движения, таких как угловая скорость, угловое и линейное ускорение. Принципы измерения основываются на том, что в неинерциальных (вращающихся или испытывающих линейное ускорение) системах отсчета на компоненты оптико-механических приборов действуют силы инерции, которые вызывают их относительные смещения и изменение траектории луча света относительно первоначальной. В статье описан предложенный нами способ измерения угловой скорости вращения, приведены результаты лабораторных исследований.

Ключевые слова: неинерциальные системы отсчета, угловая скорость, угловое ускорение, линейное ускорение.

Введение

Существует множество способов измерения параметров ускоренного движения, таких как угловая скорость, угловое и линейное ускорение. Их принципы основываются на магнитных, электрических, гироскопических явлениях, эффекте Саньяка и др. Недостатками являются невысокая чувствительность, за исключением волоконно-оптических гироскопов, чувствительность к электромагнитным воздействиям и пр. Поэтому актуальным вопросом остается создание измерителей параметров ускоренного движения с высокой чувствительностью, помехоустойчивостью, компактностью и экономичностью.

Мы предлагаем новые принципы измерения параметров ускоренного движения. Силы инерции, возникающие при вращении или линейном ускорении оптико-механических приборов, действуют на их компоненты и вызывают относительные смещения последних. Это приводит к изменению траектории лучей света в таких системах, что либо является источником помех при работе оптико-механического прибора, либо может быть использовано для получения полезной информации о параметрах ускоренного движения таких приборов. Регистрировать смещение компонентов оптических приборов можно двумя способами: по смещению луча света по поверхности позиционно-чувствительного фотоприемника (однолучевые системы) и по изменениям интерференционной картины (двулучевые системы). Результат зависит от пространственного расположения компонентов, способа крепления на плоскости вращения.

Вращение интерферометра Фабри-Перо

Рассмотрим интерферометр, представляющий собой два зеркала, помещенных в полый цилиндр (рис. 1). Одно из зеркал (полупрозрачное) неподвижно закреплено относительно стенок цилиндра (на его торце), а другое (глухое) расположено на пружине параллельно первому (у другого торца), но может поступательно смещаться вдоль оси, перпендикулярной плоскостям зеркал.

При вращении цилиндра с угловой скоростью ω вокруг оси O , перпендикулярной оптической оси (на рисунках показана штрихпунктирной линией), на подвижное зеркало действует центробежная сила, равная

$$F_{цб} = m\omega^2 r, \quad (1)$$

где m – масса подвижного зеркала, r – радиус вращения подвижного зеркала. В противоположном направлении в сжатой пружине возникает сила упругости

$$F_{упр} = kx, \quad (2)$$

где k – коэффициент упругости пружины, определяющий сжатие пружины, а x – смещение подвижного зеркала. При этом из равенства правых частей выражений (1) и (2) следует, что угловая скорость равна

$$\omega = \sqrt{\frac{kx}{mr}}. \quad (3)$$

Величина x определяется по изменению интерференционной картины при изменении оптической разности хода лучей на величину

$$\delta\Delta = 2xn \cdot \cos \theta, \quad (4)$$

где n – показатель преломления среды между зеркалами интерферометра, θ – угол падения светового луча на поверхность интерферометра.

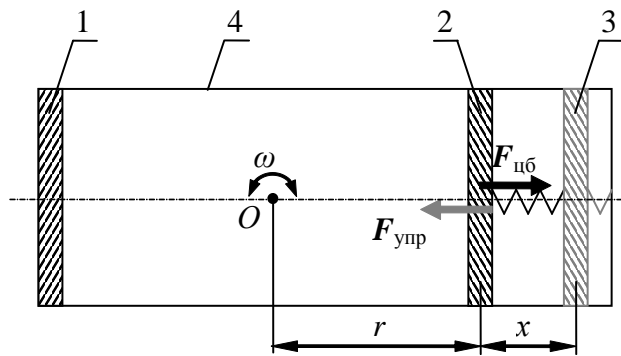


Рис. 1. Отклонение зеркала интерферометра Фабри-Перо при вращении: 1 – неподвижное зеркало; 2 – подвижное зеркало в исходном положении; 3 – смещенное подвижное зеркало; 4 – полый цилиндр

Интерферометр Фабри–Перо под действием линейного ускорения

При линейном движении рассмотренного устройства вектор линейного ускорения a направлен вдоль оптической оси, как показано на рис. 2.

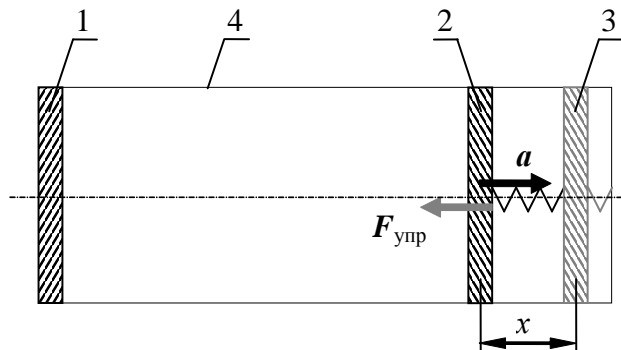


Рис. 2. Отклонение зеркала интерферометра Фабри–Перо под действием линейного ускорения: 1 – неподвижное зеркало; 2 – подвижное зеркало в исходном положении; 3 – смещенное подвижное зеркало; 4 – полый цилиндр

Возникающая при этом сила ускоренного движения подвижного зеркала в соответствии со вторым законом Ньютона равна $F=ma$. Приравняв эту силу силе сжатия пружины, определяемой формулой (2), получаем, что ускорение движения равно

$$a = \frac{kx}{m}. \quad (5)$$

Смещение x подвижного зеркала определяется так же, как описано в предыдущем разделе, при этом оптическая разность хода лучей определяется формулой (4).

Вращение и линейное ускорение интерферометра Майкельсона

Пусть одно из зеркал интерферометра неподвижно закреплено на вращающемся основании, а второе закреплено на пружине так, что может смещаться только поступательно вдоль оптической оси OA (рис. 3).

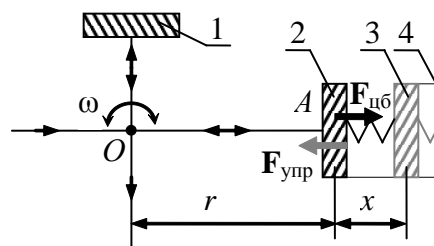


Рис. 3. Отклонение подвижного зеркала при вращении интерферометра Майкельсона: 1 – неподвижное зеркало; 2 – подвижное зеркало; 3 – смещенное подвижное зеркало; 4 – направляющий цилиндр для подвижного зеркала

Угловая скорость вращения прибора описывается формулой (3), а смещение x подвижного зеркала будет определяться по изменению оптической разности хода лучей, в этом случае равной $\delta\Delta = 2\lambda l$.

Аналогичная зависимость для изменения оптической разности хода наблюдается при линейном ускорении интерферометра Майкельсона вдоль оптической оси OA , но линейное ускорение a определяется формулой (5).

Вращение оптической системы, включающей зеркало, имеющее возможность вращаться вокруг собственной оси, перпендикулярной основанию

Рассмотрим два способа закрепления зеркала с возможностью его поворота вокруг оси, не совпадающей с осью вращения измерителя угловой скорости.

а) Зеркало крепится боковой гранью к стержню и может свободно вращаться вокруг него, с задней стороны зеркало демпфируется с помощью пружины (рис. 4). Под действием центробежной силы поворотное зеркало отклоняется от исходного положения на угол α , который, в свою очередь, определяется силой упругости, возникающей в сжатой пружине.

Центробежная сила определяется выражением (1). Сила упругости рассчитывается по формуле

$$F_{упр} = k_{\alpha} \alpha, \quad (6)$$

где k_{α} – угловой коэффициент пропорциональности пружины, определяемый ее геометрическими и физическими свойствами. Смещение луча Δx регистрируется с помощью позиционно-чувствительного фотоприемника (ПЧФП) (рис. 5) и для нормального падения луча на зеркало в исходном положении равно

$$\Delta x = l \cdot \operatorname{tg}(2\alpha), \quad (7)$$

где l – расстояние от точки падения луча света на зеркало до рабочей поверхности ПЧФП.

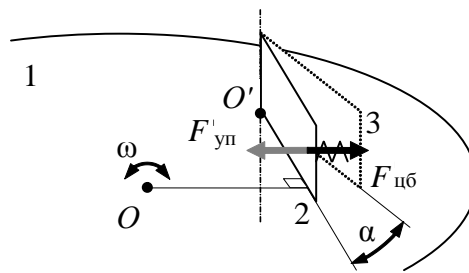


Рис. 4. Смещение поворотного зеркала, установленного на вращающемся основании и имеющего собственную ось вращения: 1 – вращающееся основание; 2 – поворотное зеркало в исходном положении; 3 – смещенное поворотное зеркало

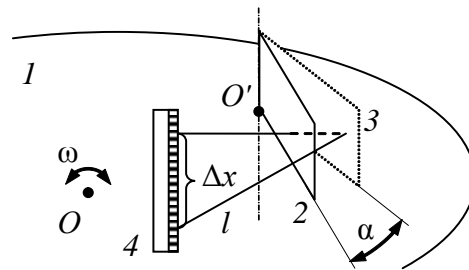


Рис. 5. Изменение координаты отраженного луча при вращении оптической системы: 1 – вращающееся основание; 2 – исходное положение зеркала; 3 – отклонившееся зеркало; 4 – ПЧФП

Из равенства правых частей формул (1) и (6) с подстановкой угла α из формулы (7) следует, что угловая скорость равна

$$\omega = \sqrt{\frac{k_{\alpha} \operatorname{arctg}\left(\frac{\Delta x}{l}\right)}{2mr}},$$

где r – расстояние от оси вращения измерителя угловой скорости до плоскости зеркала в исходном положении.

б) Зеркало крепится с помощью пластины перпендикулярно основанию и может поворачиваться вокруг собственной оси за счет изгиба пластины (рис. 6).

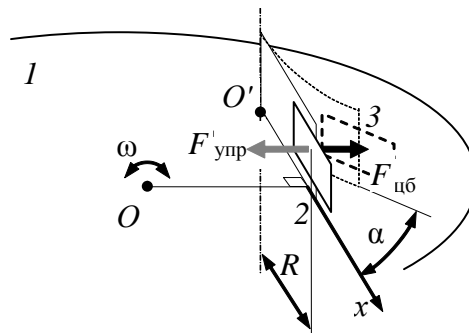


Рис. 6. Смещение поворотного зеркала, установленного на вращающемся основании и имеющего собственную ось вращения: 1 – вращающееся основание; 2 – поворотное зеркало в исходном положении; 3 – смещенное поворотное зеркало

Под действием центробежной силы поворотное зеркало отклоняется от исходного положения на угол α , который, в свою очередь, определяется силой упругости, возникающей в сжатой пружине. Центробежная сила определяется выражением (1). Сила упругости рассчитывается по формуле [1]

$$F_{\text{упр}} = \frac{2EJ_z \alpha}{R^2}, \quad (8)$$

где E – модуль Юнга, J_z – момент инерции, определяемый профилем крепежной пластины, R – расстояние от оси вращения пластины до точки крепления зеркала. Из равенства правых частей (1) и (8) угловая скорость равна

$$\omega = \sqrt{\frac{2EJ_z \alpha}{mrR^2}}. \quad (9)$$

Угол α рассчитывают по выражению (7) из смещения x луча по поверхности ПЧФП.

Использование описанных эффектов для определения параметров движения в неинерциальных системах отсчета

Полученные выводы можно использовать для определения параметров ускоренного движения. Например, нами предложен измеритель угловой скорости вращения [2].

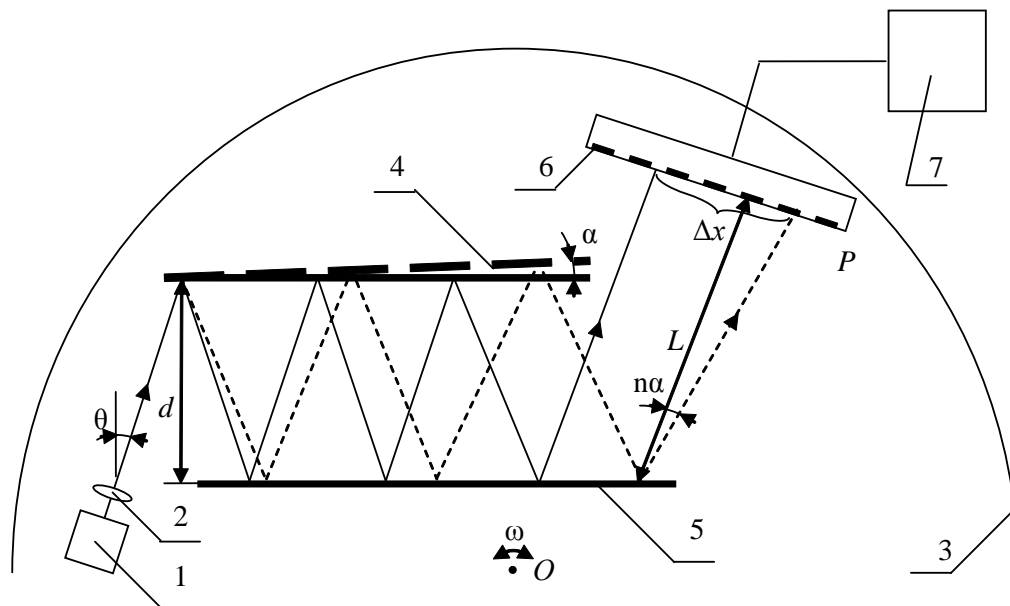


Рис. 7. Схема устройства для измерения угловой скорости вращения: 1 – источник света, 2 – объектив, 3 – вращающееся основание, 4 – подвижное зеркало, 5 – неподвижное зеркало, 6 – фотоприемник, 7 – блок обработки данных

Принцип действия основан на измерении изменения положения светового луча на поверхности ПЧФП, обусловленного смещением луча, отраженного подвижным массивным зеркалом, поворачивающимся под действием центробежной силы, при этом угол отклонения луча увеличивают за счет многократного прохождения этого луча в зеркальном умножителе (рис. 7). Выходной луч зеркального умножителя направляют на поверхность фотоприемника, который регистрирует положение пятна на светочувствительной поверхности. Затем выходной сигнал подают на цифровой осциллограф и обрабатывают с помощью ПК. В результате регистрируют изменение напряжения на выходе фотоприемника, связанное с изменением положения луча на поверхности фотоприемника.

Угловая скорость вращения определяется по формуле (9). Величину угла α можно вычислить из зависимости смещения луча по поверхности фотоприемника от угла отклонения зеркала:

$$\Delta x = d \cos(\theta + \alpha) \cos \theta \sum_{n=1}^N \left[\frac{\operatorname{tg}(\theta + 2(n-1)\alpha) + \operatorname{tg}(\theta + 2n\alpha)}{\cos(\theta + (2n-1)\alpha)} \right] - 2Nd \sin \theta + L \cdot \operatorname{tg}(2N\alpha) ,$$

где N – число пар отражений, L – расстояние от точки последнего отражения пучка света от неподвижного зеркала до поверхности ПЧФП. В расчете принимается, что луч света падает на поворотное зеркало в точке, лежащей на оси вращения зеркала.

Выводы

Рассмотрено несколько вариантов искажений сигнала на выходе оптической системы, вносимых отклонением компонентов оптико-механических приборов от первоначального положения. Искажение выходного сигнала (изменение его положения или его фазы) можно использовать для определения характеристик движения в неинерциальных системах отсчета. Предложен способ измерения угловой скорости вращения, основанный на измерении изменения положения светового луча на поверхности ПЧФП, обусловленного смещением луча, отраженного подвижным массивным зеркалом, поворачивающимся под действием центробежной силы, при этом угол отклонения луча увеличиваются за счет многократного прохождения этого луча в зеркальном множителе.

Литература

1. Водопьянов В.И., Савкин А.Н. Сопротивление материалов. Краткий курс, контрольные задания: Учебное пособие. – Волгоград: ВолгГТУ, 2002. – 64 с.
2. Заявка на полезную модель № 2008140497 «Измеритель угловой скорости вращения» / Богатырева В.В., Дмитриев А.Л. – Приоритет от 13.10.2008.

Богатырева Валерия Владимировна – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, carlo.01@mail.ru, carlo02@yandex.ru

УДК 621.38

ЗАКРЫТАЯ СХЕМА ОБРАБОТКИ СИГНАЛА В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОМ ДАТЧИКЕ ТОКА

И.К. Мешковский, В.Е. Стригалева, С.А. Тараканов

Рассматривается способ увеличения точности волоконно-оптического интерферометрического датчика тока в большом диапазоне измеряемых токов путем использования закрытой схемы обработки сигнала, а также способ контроля работы модулятора путем введения второй обратной связи в схему обработки.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик тока, волоконная интерференционная схема, модулятор двулучепреломления, закрытая схема обработки сигнала.

Введение

В настоящее время эффект Фарадея является наиболее удобным для использования в волоконно-оптическом датчике тока (ВОДТ). В датчике такого типа информацию о силе тока несет свет, который проходит волоконно-оптический контур, охватывающий контролируемый проводник. Такое устройство обеспечивает ВОДТ высокую точность, электроизолированность, малые массогабаритные показатели, а также удобство

установки и эксплуатации. Задачей исследования явилось повышение точности и расширение динамического диапазона ВОДТ.

Интерференционный ВОДТ по схеме с обратным отражением

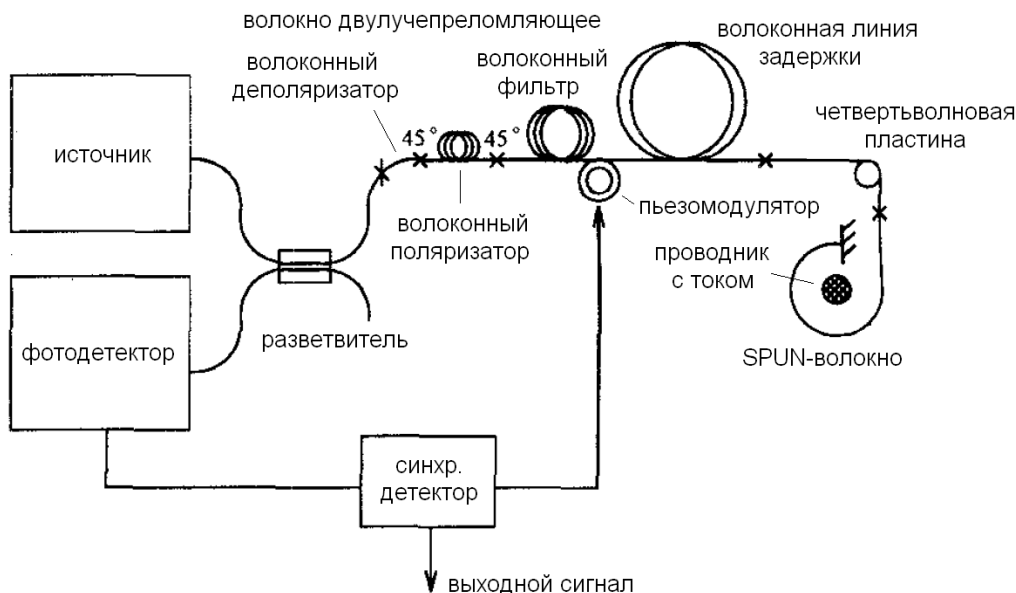


Рис. 1. Конфигурация ВОДТ по схеме с обратным отражением

Рассмотрим наиболее перспективную конфигурацию ВОДТ, построенную на основе волоконного интерферометра с обратным отражением (рис. 1) [1–4]. Разница фаз интерферирующих волн $\Delta\Phi_\phi$ в таком датчике прямо пропорциональна протекающему току I :

$$\Delta\Phi_\phi = 4VNI,$$

где V – постоянная Верде, N – количество витков волокна вокруг проводника. Эта разница фаз измеряется следующим образом. Свет от источника излучения проходит через деполяризатор, который снимает остаточную поляризацию излучения. Далее в поляризаторе свет преобразуется в линейно-поляризованный, а за ним разделяется на две волны, равные по амплитуде, направляемые по быстрой и медленной оптическим осям двулучепреломляющего волокна. В фильтре эти волны разводятся по времени, чтобы предотвратить последствия преобразования мод, и попадают на пьезомодулятор двулучепреломления, обеспечивающий работу интерферометра в квадратурном режиме. После этого они проходят линию задержки, что обеспечивает приемлемую собственную частоту контура, на которой «успевает» работать пьезомодулятор. В четвертьволновой пластине волны преобразуются в противоположно циркулярно-поляризованные. В результате действия магнитного поля на специальное SPUN-волокно, в котором оси двулучепреломления скручены вдоль направления распространения света, в чувствительной части датчика левоциркулярная и правоциркулярная волны получают относительный фазовый сдвиг. Отразившись от зеркала, волны проходят чувствительную часть в обратную сторону, фазовый сдвиг между ними удваивается. После прохода четвертьволновой пластины волны обратно преобразуются в линейно-поляризованные, при этом та волна, которая проходила датчик по быстрой оси двулучепреломляющего волокна, направляется в медленную ось, и наоборот. Волны проходят следующие три элемента в обратном порядке и интерферируют на входе поляризатора. Таким образом, достигается взаимность распространения двух волн в датчике, т.е. они проходят абсо-

лотно одинаковые пути. Результат интерференции фиксируется на фотодетекторе и с помощью синхронного детектора преобразуется в выходной сигнал датчика.

Интерферирующие волны в волоконном интерферометре с обратным отражением все время находятся относительно близко в пространстве, что делает датчик очень стабильным по отношению к внешним воздействиям, таким как изменение температуры и вибрации. В то же время при гармонической модуляции отклик интерферометра представляет собой синусоидальную функцию, что ограничивает диапазон измеряемых токов и не позволяет получить линейную зависимость выходного сигнала от тока.

Закрытая схема обработки сигнала

Для преодоления недостатков схемы ВОДТ с обратным отражением предлагается использовать закрытую схему обработки сигнала, аналогичную используемой в волоконной гироскопии [4]. Сигнал о силе тока используется как сигнал ошибки, с помощью которого создается обратная связь в системе в виде введения дополнительной разности фаз $\Delta\Phi_{oc}$, компенсирующей вызванную магнитным полем разность фаз. Суммарная разность фаз удерживается в нуле, что обеспечивает большую точность и динамический диапазон, так как система всегда работает в точке с максимальной чувствительностью. В закрытой схеме измеряемым сигналом становится сигнал обратной связи, что приводит к линейной зависимости с большой стабильностью, потому что этот сигнал обратной связи не зависит от пришедшей на фотодетектор оптической мощности и коэффициента усиления регистрирующего каскада.

Пьезомодулятор на необходимой частоте может обеспечить только гармоническую модуляцию сигнала, поэтому предлагается вместо него использовать модулятор двулучепреломления на основе канального волновода в ниобате лития (рис. 2). Используется X-срез кристалла ниобата лития, двулучепреломляющие волокна пристыкуются к кристаллу таким образом, чтобы быстрые оси волокна совпадали с быстрой осью волновода. Разница фаз вносится за счет отличия электрооптических коэффициентов для быстрой и медленной осей волновода в ниобате. Такой модулятор обладает достаточным быстродействием и позволяет подавать на него сигналы обратной связи необходимой формы.

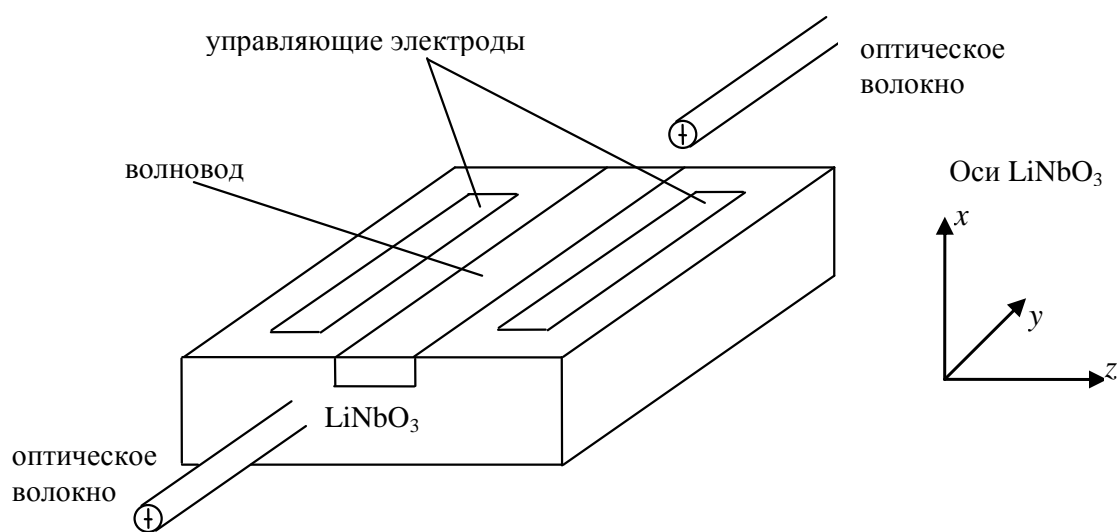


Рис. 2. Волоконно-оптический фазовый модулятор двулучепреломления на ниобате лития

Для введения компенсирующей разницы фаз удобно использовать линейно увеличивающееся напряжение, подаваемое на управляющие электроды интегрально-оптического модулятора. В ВОДГ по схеме с обратным отражением интерферирующие волны проходят через модулятор дважды, и разница фаз $\Delta\Phi_M$ между ними увеличивается с задержкой ΔT . Таким образом, компенсирующую разницу фаз $\Delta\Phi_{oc}$ можно регулировать скоростью нарастания напряжения во времени T . Нарастание фазы $\Delta\Phi_M$ не может быть бесконечным, и на практике используется пилообразная модуляция со сбросом пилы $\Phi_{сб}$ на 2π (рис. 3).

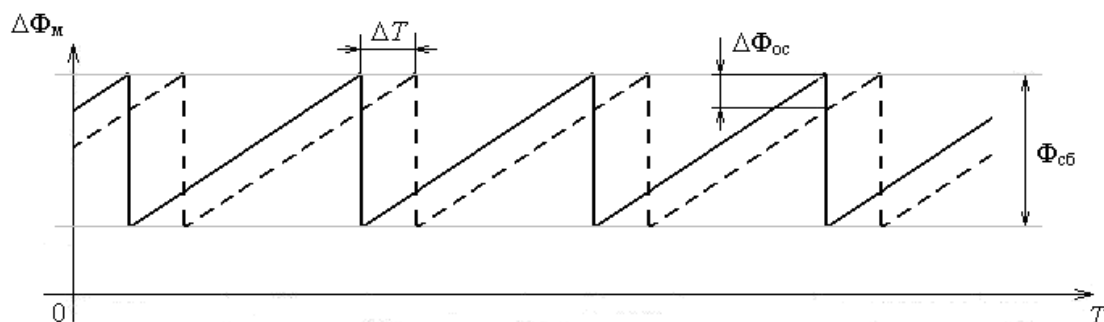


Рис. 3. Аналоговая пилообразная модуляция

Аналоговая фазовая модуляция очень удобна, но требует высокой линейности и скорости работы модулятора, с ней невозможно синхронизировать модуляцию, обеспечивающую квадратурный режим работы интерферометра. Трудности преодолеваются с помощью цифровой реализации пилообразной модуляции. Вместо линейного нарастания фазы цифровая пилообразная модуляция создает фазовые приращения $\Delta\Phi_{oc}$ длительностью ΔT , соответствующей времени прохода сигнала по интерферометру, и соответствующие сбросы ступенчатой пилы. Эти фазовые приращения и сбросы легко синхронизировать с квадратурной прямоугольной фазовой модуляцией (рис. 4). Блок обработки в таком случае выполняется на основе аналого-цифрового преобразователя (АЦП), логической схемы и цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). Логическая схема строится на основе программируемой логической интегральной схемы.

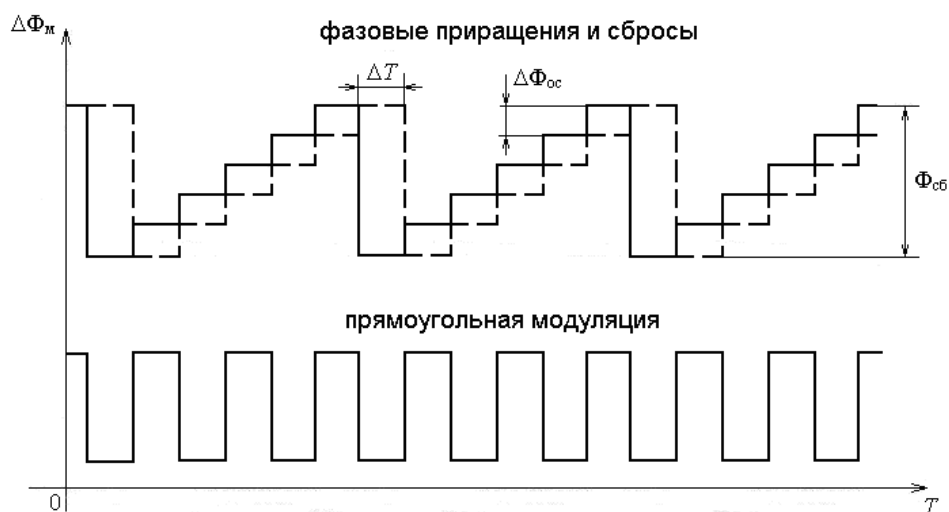


Рис. 4. Цифровая пилообразная модуляция, синхронизированная с прямоугольной

Цифровая пилообразная модуляция удобна еще и тем, что можно ввести вторую обратную связь, контролирующую работу модулятора, так как модулируемая им фаза зависит не только от управляющего напряжения на выходе ЦАП, но и от внешних условий (температуры, вибрации и т. п.). При отклонении сброса пилы от 2π появляется дополнительное изменение сигнала на фотоприемнике в моменты сброса. Логическая схема подстраивает итоговый сигнал, подаваемый на ЦАП, и через некоторое время величина сброса приводится к нужному значению.

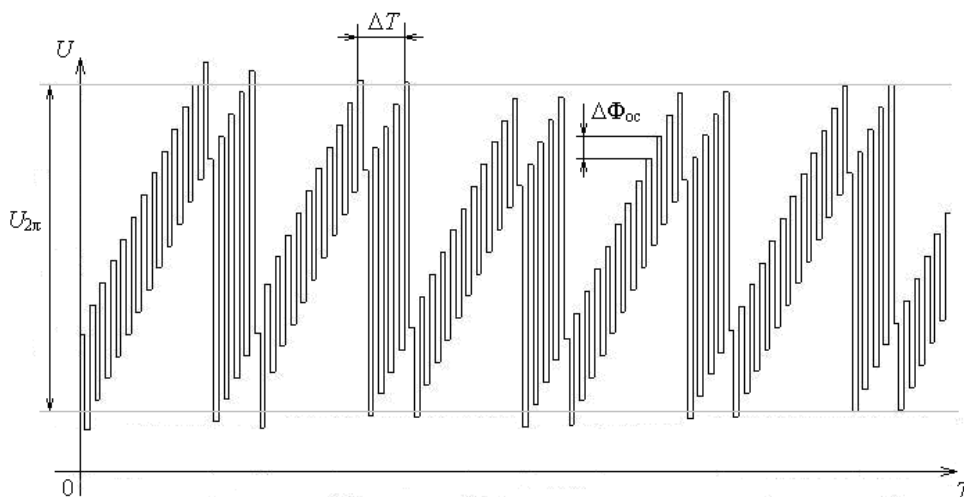


Рис. 5. Результат работы модели пилообразной цифровой модуляции

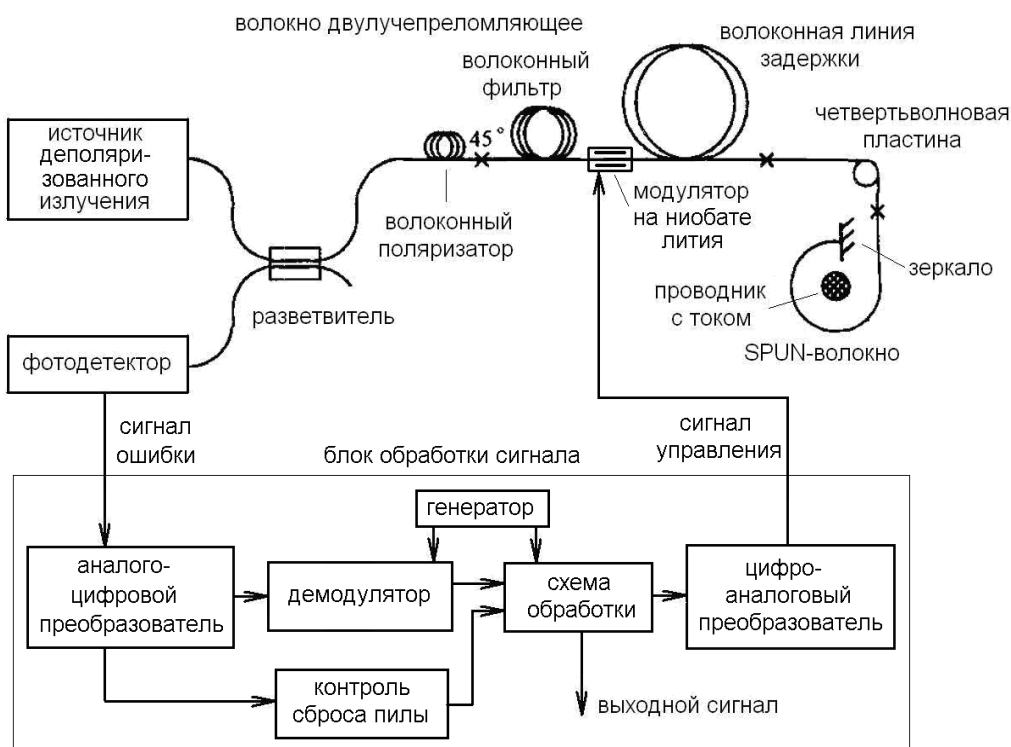


Рис. 6. Конфигурация ВОДТ по схеме с обратным отражением с источником деполаризованного излучения, закрытой схемой обработки сигнала и контролем работы модулятора

Для проверки работы такой схемы была создана модель работы закрытой схемы обработки с двумя петлями обратной связи. На рис. 5 представлен график изменения управляющего напряжения на модуляторе во времени, на нем показан процесс приведения первоначального отклоненного сброса пилы к значению $U_{2\pi}$, соответствующему по фазе 2π . В настоящее время вместо применения деполяризатора удобнее заменить в ВОДТ обычный источник излучения на источник, свет которого практически деполяризован. На рис. 6 показан, с учетом последнего, ВОДТ по схеме с обратным отражением и двумя петлями обратной связи.

Заключение

В работе рассмотрены способ повышения точности волоконно-оптического датчика тока в большом диапазоне измеряемых токов и увеличения линейности выходного сигнала посредством введения первой обратной связи в схеме обработки сигнала, а также способ улучшения работы модулятора в различных эксплуатационных условиях с помощью второй обратной связи.

Литература

1. Dong X., Chu C.B., Kong K.H., Chiang K.S. Phase Drift Compensation for Electric Current Sensor Employing a Twisted Fiber or a Spun Highly Birefringent Fiber // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2000. – V. 6. – № 5. – P. 803–809.
2. Blake J., Tantaswadi P., de Carvalho R.T. In-Line Sagnac Interferometer Current Sensor // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1996. – V. 11. – № 1. – P. 116–121.
3. Bohnert K., Brändle H., Brunzel M.G., Gabus P., Guggenbach P. Highly Accurate Fiber-Optic DC Current Sensor for the Electrowinning Industry // IEEE Transactions on industry applications. – 2007. – V. 43. – № 1. – P. 180–187.
4. Kurosawa K., Shirakawa K., Kikuchi T. Development of Optical Fiber Current Sensors and Their Applications // IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific. – Dalian, China, 2005.
5. Lefevre H. The Fiber-Optic Gyroscope. – London: Artech House, 1992.

| | | |
|---------------------------------------|---|---|
| <i>Мешковский Игорь Касьянович</i> | – | Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, igorkm@spb.runnet.ru |
| <i>Стригалева Владимир Евгеньевич</i> | – | Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, кандидат физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой, vstrglv@mail.ru |
| <i>Тараканов Сергей Александрович</i> | – | Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, младший научный сотрудник, netforever@mail.ru |

УДК 621.324.8

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ СКОРОСТИ С АДАПТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ ПОМЕХ

В.В. Артемьев, Н.П. Белов, В.В. Коротаев, А.В. Смирнов, А.Д. Яськов

Рассмотрен оригинальный подход к реализации инвариантного оптико-электронного измерителя скорости оптически неоднородных поверхностей. Выбранная процедура обработки сигналов в электронном тракте позволяет осуществить адаптивную коррекцию сигналов и исключить влияние флуктуационных помех на выходные характеристики измерительного устройства.

Ключевые слова: измеритель скорости, оптически неоднородные поверхности, помехоустойчивость, инвариантные характеристики.

Введение

Оптико-электронные измерители скорости (ОЭИС) перемещения оптически неоднородных поверхностей (случайных яркостных полей) [1], таких как бумажное полотно в процессе его отлива на сеточном столе бумагоделательной машины, поток руды на транспортной ленте, поверхность металлического проката в процессе его изготовления и т.п., нуждаются в специальном подходе при выборе схемы построения оптического тракта приема и электронного тракта преобразования сигналов.

Это объясняется тем, что реальные поверхности имеют различные коэффициенты отражения и поглощения световой энергии и разные размеры неоднородностей, которые характеризуются средним радиусом корреляции [1]. Поэтому электрические сигналы на выходе фотоприемного устройства будут иметь весьма сложный характер, где преобладают флуктуационные помехи, которые не позволяют обеспечивать требуемую точность измерения скорости.

Физическая модель преобразования сигналов в ОЭИС

Возникновение модулированного сигнала на выходе приемника оптического излучения ОЭИС оптически неоднородной поверхности можно представить физической моделью, показанной на рис. 1, а. Изображение контролируемой поверхности формируется объективом 1 в плоскости раstra (периодической решетки) 2. Модулированное растром 2 оптическое излучение с помощью конденсора 3 собирается в плоскости приемника оптического излучения 4, который преобразует оптические сигналы в электрические. После преобразования усилителем 5 электрические сигналы поступают в блок обработки 6.

При совмещении изображения участка поверхности с растром, выполненным в виде чередующихся прозрачных и непрозрачных полос равной ширины с периодом 2δ (рис. 1, б), и перемещении этого изображения перпендикулярно полосам раstra со скоростью V_x по раstrу одновременно перемещаются изображения множества неоднородностей различного контраста и размеров со случайным и независимым взаимным положением [2]. Полный световой поток за плоскостью раstra представляет собой сумму световых потоков от каждой отдельной неоднородности с одинаковой частотой модуляции и числом периодов, но с распределенной по случайному закону начальной фазой. Суммарным световым потоком, попадающим на фотоприемник, формируется электрический сигнал на нагрузке фотоприемника, имеющий полезную составляющую, определяемую по формуле

$$f = \frac{V_x}{2\delta} \sin \alpha, \quad (1)$$

где V_u – скорость движения изображения неоднородности в плоскости решетки, 2δ – период раstra, α – угол между вектором скорости и направлением полос раstra.

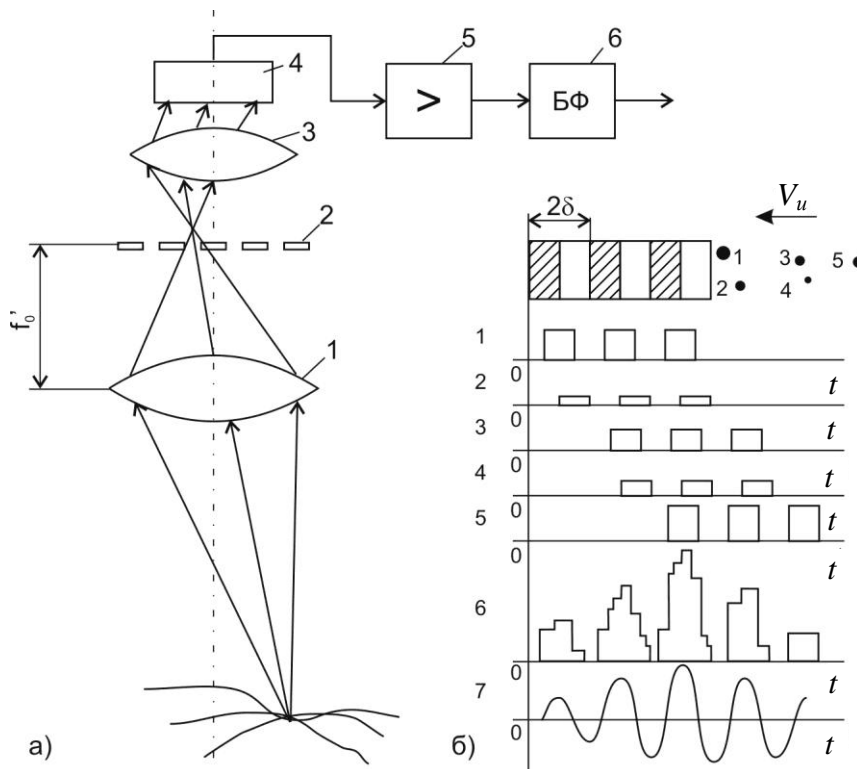


Рис. 1. Физическая модель преобразования сигналов в ОЗИС

Соотношение сигнал/шум на выходе фотоприемника будет зависеть не только от уровня освещенности наблюдаемого участка поверхности, но и от согласования размеров поля зрения объектива, пространственного периода раstra и радиуса пятна рассеяния объектива со средним радиусом корреляции неоднородностей [3].

К сожалению, при согласовании всех этих параметров возникают противоречия, разрешить которые с использованием только традиционных методов не удастся. Это в значительной степени ограничивает возможности получения высокой точности при данном способе измерений.

Одним из наиболее распространенных методов построения высокоточных измерительных устройств является метод инвариантности [4], в основу которого положен принцип многоканальности с использованием как минимум двух каналов приема и преобразования сигналов, построенных таким образом, чтобы суммирование сигналов приводило к компенсации помех. При этом информационные признаки сигналов не подвергаются изменениям. Однако наличие случайных помех хотя бы в одном из каналов может привести к разрушению информационных признаков сигнала.

Реализацию принципа инвариантности к случайным помехам, возникающим в тракте приема сигналов, следует искать в классе систем с инвариантными характеристиками помехоустойчивости, для реализации которых достаточна лишь минимальная информация о характеристиках сигнала и помех. В ряде случаев такая информация вообще не нужна [5]. Такой подход к построению тракта приема и преобразования сигналов можно назвать принципом адаптивной инвариантности.

Реализации принципа адаптивной инвариантности в ОЭИС

На рис. 2 представлена функциональная схема двухканального ОЭИС оптически неоднородных поверхностей. В основу этой схемы положен принцип инвариантности, который реализуется на основе использования двух каналов анализа изображения [4, 5]. Анализатор изображения такого измерителя выполнен в виде вращающегося периодического раstra с двумя дорожками, период расположения прозрачных и непрозрачных зон на которых отличается в два раза.

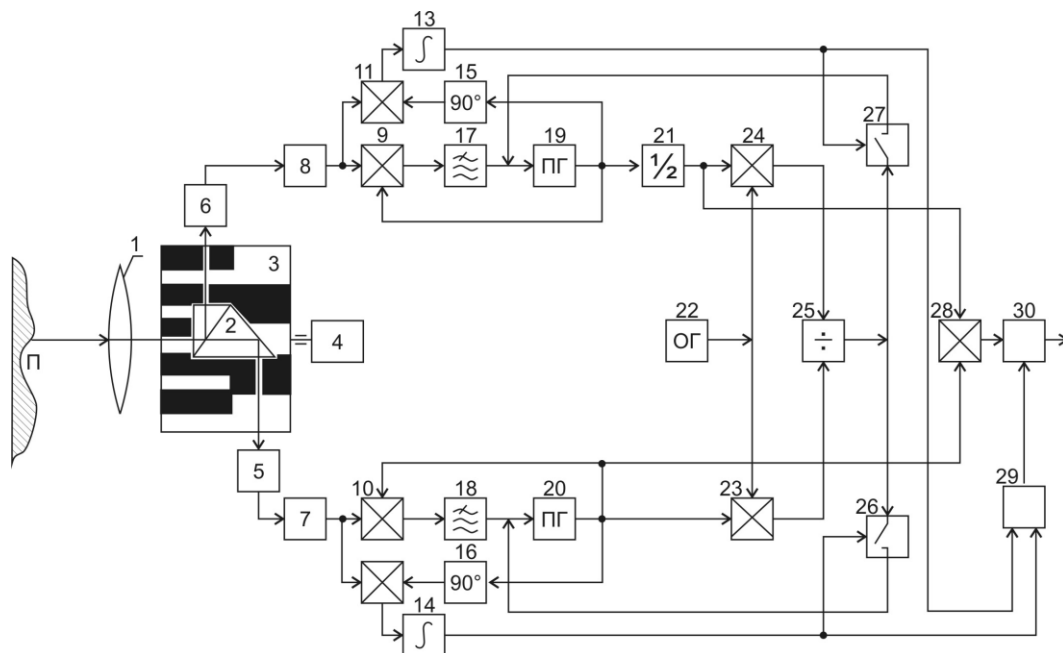


Рис. 2. Функциональная схема двухканального ОЭИС оптически неоднородных поверхностей

Периодический растр 3 приводится во вращения двигателем 4. Изображение поверхности П с помощью объектива 1 и светоделительного блока 2 формируется на диаметрально противоположных сторонах раstra на разных дорожках. Модулированные световые потоки поступают на приемники оптического излучения 5 и 6, а затем на усилители 7 и 8, снабженные полосовыми фильтрами. Электрические сигналы на выходе полосовых фильтров, полученные на экспериментальном макете, представлены на рис. 3. Характерной особенностью этих сигналов является тот факт, что их амплитуды подвержены резким колебаниям вплоть до полного исчезновения. Это связано с колебаниями соотношения между размером изображения неоднородности поверхности и шагом раstra с изменением освещенности поверхности и контраста неоднородности. Однако эти модулированные сигналы жестко синхронизированы по фазе относительно друг друга, что позволяет использовать их для компенсации начального изменения фазы в каждом из каналов электронного тракта обработки сигналов. После усиления и фильтрации электрические сигналы поступают в электронный тракт обработки сигналов. В состав этого тракта входят перемножители 9, 10, 11 и 12; интеграторы 13 и 14; фазовращающие цепочки 15 и 16; фильтры нижних частот 17 и 18; перестраиваемые генераторы 19 и 20; делитель на 2 частоты сигнала 21; опорный генератор 22; перемножители 23 и 24; устройство сравнения 25; переключающие устройства 26 и 27; устройство перемножения сигналов (вычитания частот) 28; блоки 29 и 30, обеспечивающие передачу информации в цепь управления, если сигнал присутствует хотя бы в одном из каналов.

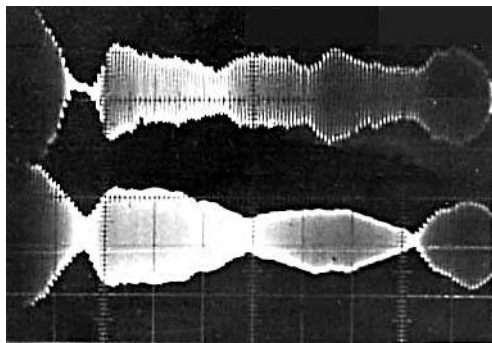


Рис. 3. Электрические сигналы на выходе полосовых фильтров

Рассмотрим характер изменения частот сигналов в каждом из каналов. При неподвижном изображении в плоскости раstra частота электрических сигналов на выходах приемников излучения определяется выражениями

$$f_{01} = \frac{V_p}{2\delta}, \quad (2)$$

$$f_{02} = \frac{V_p}{4\delta}, \quad (3)$$

где V_p – линейная скорость движения участка раstra, 2δ – пространственный период раstra первой дорожки, 4δ – пространственный период раstra второй дорожки. При движении изображения в плоскости раstra со скоростью V_u центральная частота электрического сигнала на выходе каждого из приемников излучения смещается на величину

$$\Delta f_1 = \frac{V_u}{2\delta}, \quad (4)$$

$$\Delta f_2 = \frac{V_u}{4\delta}. \quad (5)$$

Частоты электрических сигналов, формируемых на выходах приемников излучения каждого из каналов, будут изменяться в зависимости от направления движения

$$f_1 = f_{01} \pm \Delta f_1, \quad (6)$$

$$f_2 = f_{02} \pm \Delta f_2. \quad (7)$$

Подставив f_{01} , f_{02} , Δf_1 , Δf_2 в выражения (6) и (7), получим:

$$f_1 = \frac{V_p + V_u}{2\delta}, \quad (8)$$

$$f_2 = \frac{V_p - V_u}{4\delta}. \quad (9)$$

Анализ полученных выражений показывает, что частоты f_1 и f_2 определяются пространственным периодом 2δ и 4δ . Для удобства обработки сигналов в электронном тракте введено устройство деления частоты на 2 (обозначено на рис. 2 цифрой 21)

$$f_1/2 = \frac{V_p + V_u}{4\delta}. \quad (10)$$

Таким образом,

$$f_1/2 - f_2 = \frac{V_p + V_u}{4\delta} - \frac{V_p - V_u}{4\delta} = \frac{2V_u}{4\delta}. \quad (11)$$

За счет этого удается исключить скорость движения периодического раstra.

Блоки 9, 11 и 13 в одном канале и устройства 10, 12, 14 в другом осуществляют операцию обнаружения случаев пропадания сигналов на выходе фотоприемников 5, 6 соответственно. При обнаружении одновременного пропадания сигналов поступление сигналов в цепь индикации после блока 28 перекрывается устройством 31. При пропадании сигналов в одном из каналов блоки 25 или 26 по результатам сравнения информации блоком 24 направляют сигнал в цепь управления частотой перестраиваемого генератора 18 или 19. В этом случае при замирании сигнала в одном из каналов на выходе блока 27 имеется достоверная информация о скорости движения изображения.

Наличие двух каналов пространственно-частотной фильтрации сигналов в оптическом тракте обработки сигналов с разными параметрами периодического раstra позволяет расширить возможности для согласования размеров поля зрения оптической системы и радиуса пятна рассеяния со средним радиусом корреляции оптических неоднородностей и уменьшить вероятность одновременного замирания сигналов на выходе фотоприемников. Начальная фаза гармоник сигналов каждого из каналов в такой схеме изменяется одновременно, поэтому при совместной обработке сигналов блоком 28 эти изменения компенсируются, и появляется возможность обеспечить более высокие точности измерения на малых скоростях движения изображения поверхности.

На рис. 4 представлен экспериментальный стенд, на котором осуществлялись испытания макетного образца ОЭИС перемещения оптически неоднородной поверхности, реализованного на основе описанного в статье принципа построения оптического и электронного трактов выделения и преобразования сигналов. В качестве имитатора оптически неоднородной поверхности в экспериментальном стенде используется приводимый во вращение электродвигателем барабан, на поверхности которого закреплена бумажная лента с нанесенными на нее неоднородностями различных размеров и контраста. Поверхность ленты подсвечивается двумя лампами накаливания с регулируемой мощностью.

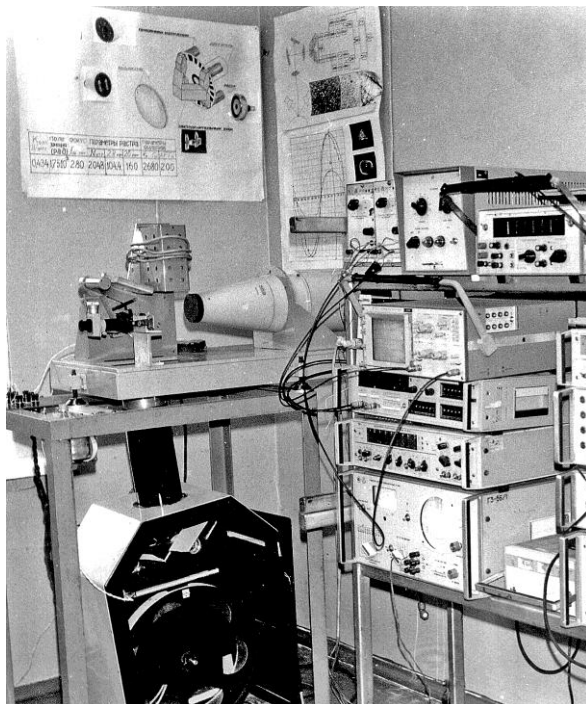


Рис. 4. Экспериментальный стенд

На рис. 5 представлены результаты экспериментального исследования ОЭИС в виде графической зависимости частоты сигнала на выходе системы от скорости пере-

мещения изображения оптически неоднородной поверхности в плоскости раstra. Прямая 1 получена путем расчета по формуле (11). Прямая 2 аппроксимирует результаты, полученные на экспериментальном стенде (показаны кружками) при реализации описанного в статье принципа построения оптического и электронного трактов выделения и преобразования сигналов и постоянной величине освещенности поверхности. Для сравнения здесь же представлена графическая зависимость (прямая 3, аппроксимирующая результаты измерений, обозначенные треугольниками), полученная на экспериментальном стенде для макетного образца ОЭИС, где каналы оптического тракта выделения сигналов имеют одинаковые размеры шага раstra [6]. Сравнение приведенных на рис. 5 графиков показывает, что экспериментальные данные исследования ОЭИС, описанной в статье, близки к расчетным и имеют меньшую дисперсию погрешности, чем данные, полученные для схемы, рассмотренной в [6].

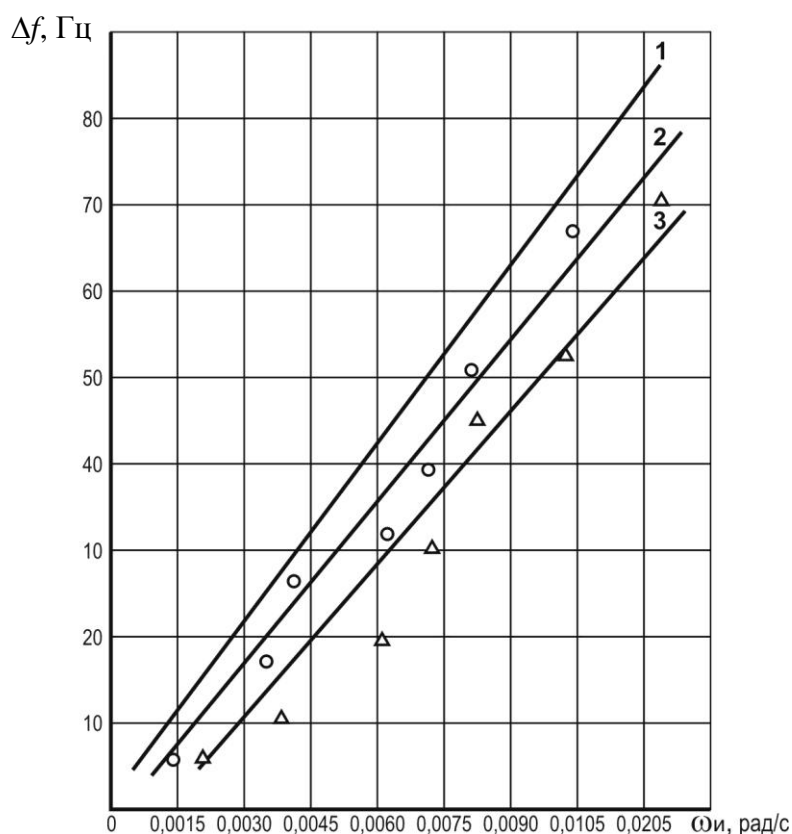


Рис. 5. Зависимость частоты сигнала на выходе системы от скорости перемещения изображения оптически неоднородной поверхности в плоскости раstra

Заключение

Выбранная двухканальная процедура обработки сигналов позволяет осуществить адаптивную коррекцию и уменьшить влияние флуктуационных помех, связанных с замиранием сигналов в одном из каналов, на выходные параметры измерительного устройства, за счет чего обеспечивается инвариантность к помехам, возникающим в оптическом тракте формирования сигналов.

Работа выполнялась в рамках ФНЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 г.г.)» и «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России (2009–2013 г.г.)»

Литература

1. Левшин В.Л. Обработка информации в оптических системах пеленгации. – М.: Машиностроение, 1978. – 168 с.
2. Соломатин В.А., Шилин В.А. Фазовые оптико-электронные преобразователи. – М.: Машиностроение, 1986. – 145 с.
3. Порфирьев Л.Ф. Теория оптико-электронных приборов и систем. – Л.: Машиностроение, 1980. – 272 с.
4. Петров Б.Н. и др. Принцип инвариантности в измерительной технике. – М.: Наука, 1976. – 246 с.
5. Артемьев В.В., Демин А.В., Панков Э.Д. Об одном способе повышения точности оптико-электронных угломерных устройств // Оптико-электронные системы и приборы: Межвузовский сборник. – Новосибирск, 1980.
6. А.с. 1543347. Устройство для измерения скорости протяженного объекта / Артемьев В.В., Шехонин А.А., Юркова Г.Н. – опубл. 1990, бюл. № 6.

| | |
|--------------------------------------|---|
| <i>Артемьев Василий Викторович</i> | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, technocon@mail.ru |
| <i>Белов Николай Павлович</i> | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, старший научный сотрудник, technocon@mail.ru |
| <i>Коротяев Валерий Владимирович</i> | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, korotaev@grv.ifmo.ru |
| <i>Смирнов Андрей Васильевич</i> | – ООО «Инженерный центр «Технокон», кандидат технических наук, заместитель генерального директора, technocon@mail.ru |

УДК 681.73.066

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ КРАСИТЕЛЕЙ И ПОВЕРХНОСТНО ОКРАШЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ЛИНЗ

Е.К. Пруненко

Статья посвящена исследованию спектральных свойств дисперсных красителей для поверхностного окрашивания полимерных очковых линз и линз, окрашенных этими красителями. Приведены спектральные характеристики красителей семи цветов и их показатели преломления при комнатной температуре и температуре окрашивания. Установлена связь между цветом красителя и цветом окрашенных линз с разной интенсивностью.

Ключевые слова: дисперсные красители, поверхностное окрашивание, спектральные характеристики, показатель преломления.

Введение

Современные тенденции развития технологий в очковой оптике позволяют окрашивать линзы в различные цвета и оттенки при использовании дисперсных красителей. Окрашивание очковых линз применяют для улучшения внешнего вида солнцезащитных очков как аксессуара и защиты от УФ излучения, для создания фильтров, устраняющих вредное излучение, в качестве терапевтической помощи больным глазными болезнями, для создания очковых линз со специфическими требованиями для различных видов спорта и в эстетических целях. В настоящее время для окрашивания полимерных линз применяют импортные красители различных фирм: BPI (USA), SHADES (USA), ACTION (Great Britain), OPTICSOL SUPER (Italy), CHEMCO (Great Britain) и

другие. Концентрат красителей выпускают как в жидких формах, так и в виде порошка. Для приготовления красильных растворов применяют дистиллированную или деионизированную воду в пропорциях 1:10 [1, 2]. Для получения различных оттенков используется комбинация трех основных цветов – красного, синего и желтого. Однако сами красители уже состоят из комбинации до 17 различных пигментов [2]. Это позволяет получить до 188 оттенков.

Окрашивание полимерных линз производят в водных дисперсиях органических красителей при повышенной температуре (70–96 °С). В основе окрашивания лежит процесс диффузии красителя в поверхностный слой линзы с адсорбцией полярных групп красителя на активных центрах полимера. По химической классификации применяемые красители относятся к азо-, диазо- и антрахиноновым красителям. В состав красильных композиций входят также различные диспергаторы, смачиватели, активаторы для обеспечения однородности и интенсификации процесса окраски. Равномерная адсорбция молекул красителя в поверхностном слое линз обеспечивает одинаковую оптическую плотность по всему диаметру и позволяет получать равномерно окрашенные линзы высоких рефракций [1].

Судить о равномерности окрашивания линзы можно после определения глубины проникновения пигментов красителя в поверхностный слой материала очковой линзы. Указывается, что мельчайшие розовые пигменты впитываются за секунды, а для синих понадобится несколько минут [2], равномерность распределения пигментов контролируется на глаз. В литературе описываются результаты поверхностного окрашивания некоторых очковых линз и приводятся спектральные характеристики линз до и после поверхностного окрашивания. Однако в доступных литературных источниках не указаны свойства красителей, такие как спектральная характеристика, коэффициент поглощения, показатель преломления, а также характеристики изменения этих параметров при нагревании растворов. Эти данные позволят еще до проведения окрашивания судить о предполагаемых спектральных характеристиках окрашиваемых очковых линз.

Исследование спектральных свойств красителей и окрашенных линз

Исследование свойств красителей для поверхностного окрашивания полимерных линз включает определение спектральных характеристик красителей, используемых для окрашивания в одном из оптических салонов Санкт-Петербурга, определение показателей преломления и изучение влияния температуры нагрева раствора красителей на показатель преломления.

Для исследования спектральных характеристик и показателя преломления были использованы следующие дисперсные красители: желтый, розовый и серый изготовителя Brain Power Incorporated (BPI), зеленый, оранжевый и синий от Coburn Optical International Incorporated и порошковый краситель коричневого цвета от Phantom Research Laboratories Incorporated. Красители разводились в дистиллированной воде в пропорции 1:10, как указано в инструкции по окрашиванию полимерных линз.

Определение спектральных характеристик выше указанных красителей проводилось на спектрофотометре Cary-500. При помощи спектрофотометра Cary-500 были получены спектральные характеристики коэффициента пропускания семи красителей, результаты которых приведены на рис. 1. Приведенные на рис. 1 спектральные характеристики позволяют судить о полосах поглощения красителей. На длине волны 560–570 нм наблюдается полоса поглощения для зеленого, серого и синего красителей, а на 900 нм – полоса поглощения для всех красителей, кроме зеленого. Полосы поглощения на длинах волн 1200, 1460 нм свойственны всем красителям, как и поглощение при длинах волн более 2300 нм.

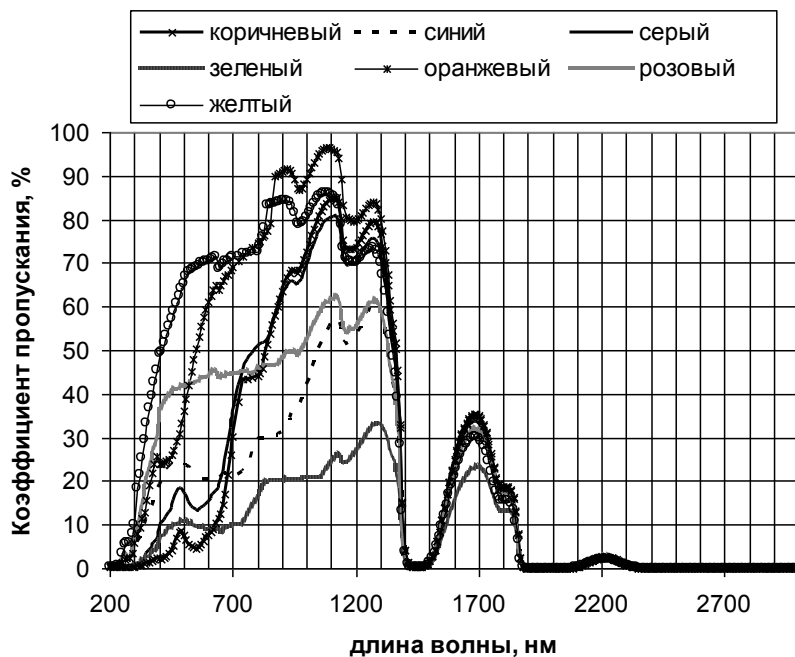


Рис. 1. Спектральные характеристики коэффициента пропускания красителей

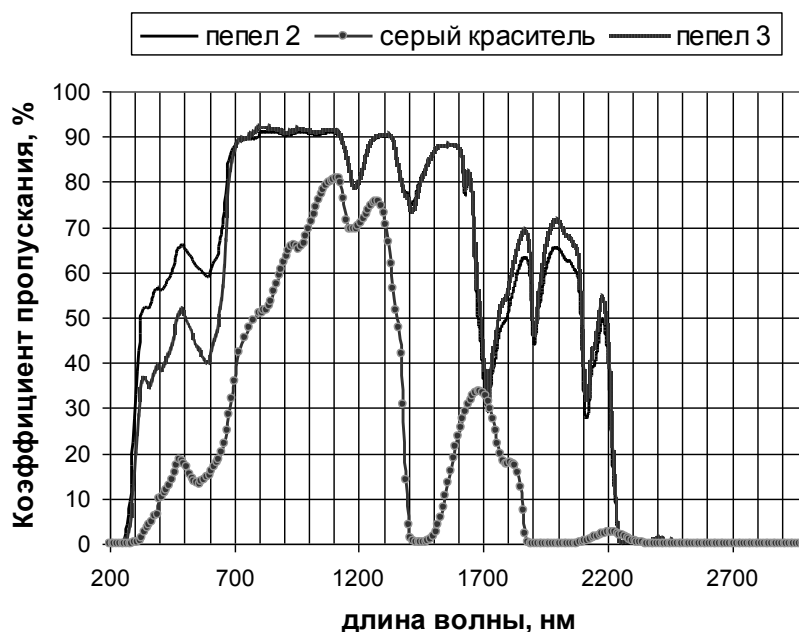


Рис. 2. Спектральная характеристика коэффициента пропускания серого красителя и окрашенных в серый цвет линз

Спектральная характеристика полимерной очковой линзы, окрашенной при помощи любого из красителей, будет повторять полосы поглощения красителя. На рис. 2 приведен пример спектральных характеристик линзы, окрашенной в серый цвет (пепел 2 с интенсивностью окрашивания 25 %, пепел 3 с интенсивностью окрашивания 50 %), и серого красителя. Как видно из рис. 2, спектральная характеристика линзы, окрашенной в серый цвет, повторяет спектральную характеристику полосы поглощения серого красителя соответственно. Полосы поглощения окрашенных серых линз с интенсивностью окраски 25 и 50 % (пепел 2, 3) в инфракрасной области спектра смещены относи-

тельно друг друга за счет расширения спектрального диапазона полимерного материала линзы. В видимой области спектра на длине волны 590 нм, а также при длине 1200 нм, полосы поглощения повторяют друг друга.

При нагревании растворов красителей происходит смещение спектральных характеристик коэффициента пропускания в ультрафиолетовую область спектра на 10–20 нм.

Измерение показателя преломления проводилось на рефрактометре ИРФ–454 БМ [3] и эллипсометре ЛЭФ–3М. При помощи рефрактометра ИРФ–454 БМ проводятся измерения показателя преломления красителей на длине волны 589,9 нм, а при помощи эллипсометра ЛЭФ–3М – на длине волны 632,8 нм. Приборы позволяют измерять показатель преломления с точностью до четвертого знака.

В таблице представлены результаты измерений показателя преломления для исследуемых растворов красителей при комнатной температуре и при 70°C.

| краситель | Измерение на рефрактометре | | Измерение на эллипсометре | |
|------------|---|---|---|------------------------|
| | показатель преломления при $T=23^{\circ}\text{C}$ | показатель преломления при $T=70^{\circ}\text{C}$ | показатель преломления при $T=23^{\circ}\text{C}$ | коэффициент экстинкции |
| Коричневый | 1,3359 | 1,3354 | 1,3325 | 0,0006 |
| Серый | 1,3350 | 1,3340 | 1,3376 | 0,0001 |
| Зеленый | 1,3349 | 1,3346 | 1,3368 | 0,0003 |
| Синий | 1,3335 | 1,3330 | 1,3322 | 0,0012 |
| Оранжевый | 1,3334 | 1,3336 | 1,3325 | 0,0006 |
| Розовый | 1,3344 | 1,3343 | 1,3344 | 0,0002 |
| Желтый | 1,3331 | 1,3335 | 1,3283 | 0,0001 |

Таблица. Результаты измерений показателя преломления красителей

Как видно из таблицы, показатели преломления красителей в нагретом состоянии отличаются от показателей преломления при комнатной температуре в третьем и четвертом знаке после запятой. Для коричневого, серого, зеленого и розового красителей показатель преломления уменьшается на 3, 5, 10 единиц четвертого знака соответственно, и показатели преломления, измеренные на длине волны 632,8 нм при помощи эллипсометра, различаются в третьем знаке после запятой. Исходя из этого, можно сказать, что дисперсия показателя преломления красителей незначительна, однако, проникая в поверхностный слой полимерного материала, она будет менять показатель преломления поверхности. Коэффициент экстинкции позволяет оценить поглощение на длине волны 632,8 нм и необходимую толщину слоя красителя в окрашенной полимерной линзе.

Заключение

В ходе исследования спектральных свойств дисперсных красителей для поверхностного окрашивания полимерных линз были получены коэффициенты пропускания красителей в широком диапазоне длин волн 200–3000 нм. Спектральные характеристики поверхностно окрашенных полимерных линз повторяют спектральные характеристики красителей. Поэтому, зная спектральные характеристики красителей, можно заранее оценить характер спектральной кривой предполагаемой цветной линзы, окрашенной при помощи дисперсных красителей.

Так как окрашивание проводится в нагретых до температуры 70–96°C растворах красителей, были исследованы показатели преломления красителей при комнатной

температуре и температуре 70°C. Нагрев раствора красителя приводит к уменьшению показателя преломления на несколько единиц четвертого знака после запятой. Измерения, проведенные на разных установках, подтверждают друг друга.

В дальнейшем планируется изучить вопрос изменения параметров поверхностного слоя линзы после окрашивания и определения глубины проникновения красителя в слой полимерного материала.

Выражаю благодарность научному руководителю, заведующему кафедрой оптических технологий, д.т.н., профессору Э.С. Путилину.

Литература

1. Щербакова О.В. Окрашивание полимерных очковых линз. – М.: Центр поддержки оптического бизнеса, 1998. – 46 с.
2. Ферридэй А. Тонирование очковых линз красителем ВРІ // Веко. – 1998. – № 4 (16). – С. 18–19.
3. Рефрактометр ИРФ-454 БМ. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Г 34.15.051 ТО.

Пруненко Елена Константиновна – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, prunenکو@pochta.ru

УДК: 535.374

ОСОБЕННОСТИ НЕПРЕРЫВНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ТРЕХМИКРОННОГО Er:YLF-ЛАЗЕРА ПРИ СЕЛЕКТИВНОЙ НАКАЧКЕ НА НИЖНИЙ ($^4I_{13/2}$) И ВЕРХНИЙ ($^4I_{11/2}$) ЛАЗЕРНЫЕ УРОВНИ

Д.Ю. Сачков

Теоретически исследуется зависимость спектрально-энергетических характеристик генерации кристалла Er:YLF от параметров апконверсии с уровней лазерного перехода $^4I_{11/2}$ – $^4I_{13/2}$ и способа селективной накачки. Предложенная модель также может быть использована для других эрбиевых кристаллов.

Ключевые слова: эрбий, лазер, селективная накачка, непрерывная генерация.

Введение

Лазеры, излучающие в области 3 мкм, перспективны для применения в различных областях медицины. Это связано с сильным поглощением их излучения водой, входящей в состав биологических тканей, которое позволяет реализовать ряд прецизионных воздействий как на мягкие, так и твердые биологические ткани [1, 2]. Одним из наиболее распространенных типов трехмикронных лазеров являются эрбиевые лазеры.

В настоящий момент реализовано несколько вариантов селективной накачки кристаллов, активированных ионами Er^{3+} , а именно накачка на уровень $^4I_{9/2}$ [3], на верхний лазерный уровень трехмикронного перехода $^4I_{11/2}$ [4], а также на нижний лазерный уровень $^4I_{13/2}$ [5]. Для последних двух случаев требуется излучение с длиной волны в области 0,95–1 мкм и 1,5 мкм соответственно. Для данных диапазонов длин волн существуют мощные лазерные диоды, что делает перспективными эти два способа накачки. В настоящей работе теоретически исследованы спектрально-энергетические характеристики генерации Er:YLF-лазера в области 3 мкм при резонансной накачке на верхний ($^4I_{11/2}$) и нижний ($^4I_{13/2}$) лазерные уровни.

Описание аналитической модели эрбиевого лазера

Согласно расчетам, выполненным в рамках шестиуровневой модели среды Er:YLF, приведенной в работе [6], в случае селективной накачки на один из уровней лазерного перехода $^4I_{11/2}$ – $^4I_{13/2}$, значения поглощенной плотности мощности излучения накачки до 30 кВт/см³ и длительности импульса накачки до 2 мс на лазерных уровнях находится не более 5% от общего числа атомов в системе, а населенности уровней, лежащих выше верхнего лазерного уровня $^4I_{11/2}$, на 2–3 порядка меньше населенностей уровней $^4I_{11/2}$ и $^4I_{13/2}$. Таким образом, населенность основного состояния $^4I_{15/2}$ можно считать примерно постоянной и равной концентрации ионов эрбия. В этом случае для расчета параметров генерации эрбиевого лазера можно использовать следующую систему балансных уравнений [7] для населенностей верхнего (N_2) и нижнего (N_1) лазерных уровней и интенсивности излучения в резонаторе I :

$$\begin{cases} \frac{dN_2}{dt} = -(\sigma_e(\lambda)N_2 - \sigma_a(\lambda)N_1) \frac{I\lambda}{hc} - N_2 A_2 + k\gamma_1 N_1^2 - (2 - k_2)\gamma_2 N_2^2 + R_2 \\ \frac{dN_1}{dt} = (\sigma_e(\lambda)N_2 - \sigma_a(\lambda)N_1) \frac{I\lambda}{hc} - N_1 A_{10} + (A_{21} + W_{21})N_2 - 2\gamma_1 N_1^2 + k_1\gamma_2 N_2^2 + R_1, \\ \frac{dI}{dt} = [(\sigma_e(\lambda)N_2 - \sigma_a(\lambda)N_1) - \delta(\lambda)] \mu V \frac{I\lambda}{hc} + qN_2 \end{cases} \quad (1)$$

где A_{mn} – скорость спонтанных излучательных переходов между уровнями m и n , W_{mn} – скорость безызлучательных переходов между уровнями m и n , $A_2 = A_{20} + A_{21} + W_{21}$, γ_1, γ_2 – параметры безызлучательного переноса энергии возбуждения на верхние энергетические уровни с уровня ${}^4I_{13/2}$ (γ_1) и ${}^4I_{11/2}$ (γ_2) посредством нелинейных процессов межзонного взаимодействия, q – коэффициент, учитывающий вклад спонтанного излучения в интенсивность излучения в резонаторе, $\delta(\lambda)$ – полные потери излучения в резонаторе, $\sigma_e(\lambda), \sigma_a(\lambda)$ – сечения вынужденного излучения и поглощения на переходе с длиной волны λ , $V_c = c/n_{ar}$ – скорость света в активном элементе, n_{ar} – показатель преломления активного элемента. Коэффициент заполнения резонатора μ учитывает, что активный элемент заполняет не весь объем резонатора, и может быть рассчитан по формуле $\mu = n_{ar} l_{ar} / (L + (n_{ar} - 1)l_{ar})$, где l_{ar} – длина активного элемента, L – длина резонатора, R_1, R_2 – скорости накачки на нижний и верхний лазерный уровень соответственно. Скорость накачки связана с поглощенной плотностью мощности излучения накачки P_p выражением $R_i = P_{p,i} \lambda_{p,i} / hc$ ($i=1, 2$). Накачке на верхний лазерный уровень соответствует средняя длина волны накачки $\lambda_{p,2} = 0,97$ мкм, на нижний – $\lambda_{p,1} = 0,5$ мкм. Для обозначения процессов безызлучательного переноса энергии возбуждения посредством нелинейных процессов межзонного взаимодействия будем использовать термин апконверсия, а соответствующие параметры γ_1 и γ_2 называть параметрами апконверсии.

Коэффициенты k, k_1, k_2 ($k, k_1, k_2 \leq 1$) учитывают процессы ветвления при релаксации с уровней, которые лежат выше верхнего лазерного уровня ${}^4I_{11/2}$ и заселяются посредством апконверсии. Однако вследствие малого времени жизни этих уровней и их относительно малой населенности предполагается, что релаксация с них происходит мгновенно. Коэффициент k учитывает процесс ветвления при релаксации возбуждения с уровня ${}^4I_{9/2}$ на верхний лазерный уровень ${}^4I_{11/2}$. Согласно данным [6], из-за наличия мощной безызлучательной релаксации с этого уровня для кристалла Er:YLF можно принять значение $k=1$. Коэффициенты k_1 и k_2 учитывают заселение уровней ${}^4I_{13/2}$ и ${}^4I_{11/2}$ при релаксации возбуждения с уровня ${}^4S_{9/2}$ посредством нелинейных процессов межзонного взаимодействия. Коэффициент k_2 также учитывает процессы многоступенчатой релаксации возбуждения с верхних уровней на уровень ${}^4I_{11/2}$.

Спектральные особенности непрерывной генерации Er:YLF-лазера при накачке на уровни ${}^4I_{11/2}$ и ${}^4I_{13/2}$

В процессе непрерывной лазерной генерации вклад вынужденных переходов в излучение генерации значительно превышает вклад спонтанных переходов. По этой причине в третьем уравнении системы (1) можно пренебречь слагаемым с множителем q . Кроме того, в этом случае величина $\sigma_e(\lambda)N_2 - \sigma_a(\lambda)N_1$, представляющая собой показатель усиления, равна показателю полных потерь излучения в резонаторе $\delta(\lambda)$. Потери излучения в резонаторе $\delta(\lambda)$ будем считать неселективными: $\delta(\lambda) = \delta = const$. Для краткости далее вместо $\sigma_e(\lambda)$ и $\sigma_a(\lambda)$ будем писать соответственно σ_e и σ_a .

В случае селективной накачки на нижний лазерный уровень ($R_1=R$, $R_2=0$) система уравнений (1) имеет следующее стационарное решение:

$$\begin{cases} N_2 = \frac{2\delta a - \sigma_a b - \sigma_a \sqrt{b^2 - 4ac}}{2\sigma_e a}, \\ N_1 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \\ \hat{I}_{low} = hv \left[\left(k\gamma_1 - (2-k_2) \frac{\sigma_a^2}{\sigma_e^2} \gamma_2 \right) \left(\frac{b^2 + b\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a^2\delta} - \frac{c}{a\delta} \right) - \frac{(2-k_2)\gamma_2}{\sigma_e^2} \left(\frac{\delta a - \sigma_a(b + \sqrt{b^2 - 4ac})}{a} \right) - \frac{A_2}{\delta} \left(\frac{2\delta a - \sigma_a(b + \sqrt{b^2 - 4ac})}{2\sigma_e a} \right) \right], \end{cases} \quad (2)$$

где $a = \gamma_1(k-2) - (2-k_1-k_2)\gamma_2(\sigma_a/\sigma_e)^2$, $b = -A_{10} - (\sigma_a/\sigma_e)A_{20} - 2(2-k_1-k_2)\gamma_2\delta(\sigma_a/\sigma_e^2)$, $c = R - (\delta/\sigma_e)A_{20} - (2-k_1-k_2)\gamma_2(\delta/\sigma_e)^2$. Интересно отметить, что в случае накачки на верхний лазерный уровень ${}^4I_{11/2}$ ($R_1=0$, $R_2=R$) решение соответствующей системы балансных уравнений для стационарных населенностей лазерных уровней N_1 и N_2 в точности совпадает с (2). Решение для стационарной интенсивности излучения в резонаторе в этом случае имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \hat{I}_{up} = hv \left[\left(k\gamma_1 - (2-k_2) \frac{\sigma_a^2}{\sigma_e^2} \gamma_2 \right) \left(\frac{b^2 + b\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a^2\delta} - \frac{c}{a\delta} \right) - \frac{(2-k_2)\gamma_2}{\sigma_e^2} \left(\frac{\delta a - \sigma_a(b + \sqrt{b^2 - 4ac})}{a} \right) - \frac{A_2}{\delta} \left(\frac{2\delta a - \sigma_a(b + \sqrt{b^2 - 4ac})}{2\sigma_e a} \right) + R \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Вследствие расщепления кристаллической решетки в электрическом поле энергетические уровни в эрбиевых кристаллах состоят из ряда подуровней, а сечение вынужденных переходов имеет сложную зависимость от длины волны (см., например, [8]). Выражения (2) и (3) для интенсивности излучения в резонаторе позволяют рассчитать пороговую скорость накачки для любой длины волны в пределах трехмикронного перехода. На рис. 1 представлен результат такого расчета для накачки на нижний лазерный уровень, на рис. 2 – на верхний. В расчете использовалась зависимость сечения вынужденного излучения σ_e от длины волны из работы [8]. Сечения поглощения σ_a вычислялись при помощи соотношения (9), приведенного в [7], по энергиям подуровней из [9]. Величина показателя потерь излучения в резонаторе δ была принята равной $3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$. Значения параметров апконверсии γ_1 и γ_2 выбирались в соответствии с возможным диапазоном их значений на основе данных из [6] и были приняты равными $2 \cdot 10^{-17} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ и $10^{-18} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ соответственно. Из рис. 1 и 2 видно, что в случае накачки на нижний и на верхний лазерные уровни минимальным порогом стационарной генерации обладает излучение на различных длинах волн: в первом случае – на длине волны 2,85 мкм, во втором – на длине волны 2,81 мкм. Данное различие, по-видимому, связано с тем, что распределение населенностей внутри лазерных уровней близко к распределению Больцмана. При этом в случае накачки на нижний лазерный уровень ${}^4I_{13/2}$ отношение его населенности к населенности верхнего лазерного уровня ${}^4I_{11/2}$ N_1/N_2

больше, чем при накачке на уровень $^4I_{11/2}$. В этом случае инверсия населенностей легче достигается на переходах, заканчивающихся на более высоких подуровнях уровня $^4I_{13/2}$. Этим переходам соответствует большая длина волны генерации.

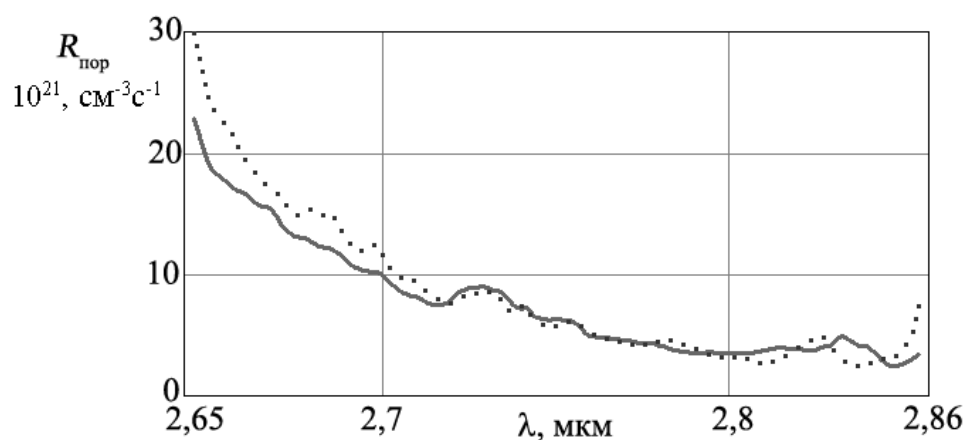


Рис. 1. Зависимость пороговой скорости накачки $R_{\text{пор}}$ от длины волны генерации для случая накачки на нижний лазерный уровень $^4I_{13/2}$ (сплошная линия – для поляризации излучения генерации в плоскости σ , линия из точек – для поляризации излучения генерации в плоскости π)

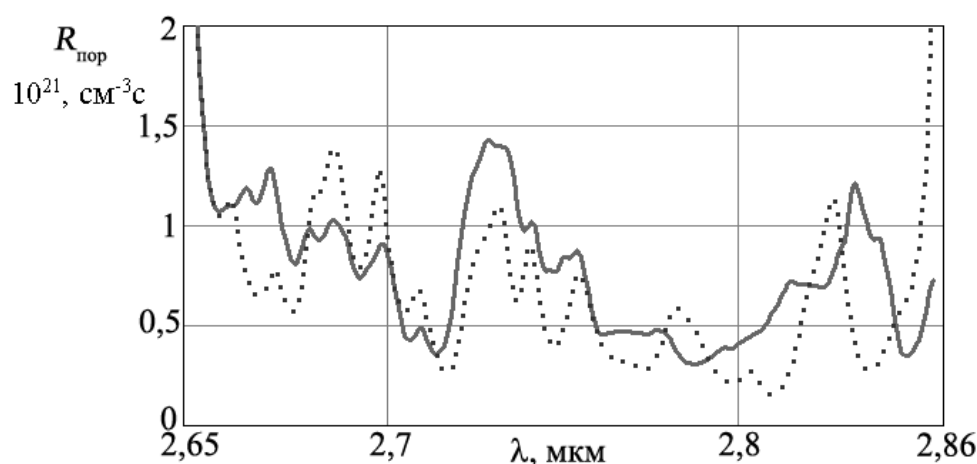


Рис. 2. Зависимость пороговой скорости накачки $R_{\text{пор}}$ от длины волны генерации для случая накачки на верхний лазерный уровень $^4I_{11/2}$ (сплошная линия – для поляризации излучения генерации в плоскости σ , линия из точек – для поляризации излучения генерации в плоскости π)

Эффективность генерации Er:YLF-лазера. Влияние процессов апконверсии

Выражения (2) и (3) могут быть использованы для расчета эффективности стационарной лазерной генерации эрбиевых кристаллов, в частности, для оценки влияния на эффективность генерации процессов апконверсии. Как известно, с изменением концентрации активатора параметры апконверсии в эрбиевых кристаллах могут варьироваться в довольно больших пределах. Для оценки влияния этих параметров на эффективность генерации используем модельную среду, у которой сечения вынужденных переходов соответствуют реальному кристаллу Er:YLF, а величины γ_1 и γ_2 изменяются в диапазо-

нах 10^{-22} – 10^{-16} $\text{см}^3\text{с}^{-1}$ и 10^{-23} – $0,5 \cdot 10^{-16}$ $\text{см}^3\text{с}^{-1}$ соответственно. Границы диапазонов изменения величин γ_1 и γ_2 выбраны в соответствии с данными [6].

В качестве характеристики эффективности генерации будем использовать дифференциальный КПД $\eta = d\hat{I} / dP_p$, где $\hat{I} = \hat{I}_{low}$, либо $\hat{I} = \hat{I}_{up}$.

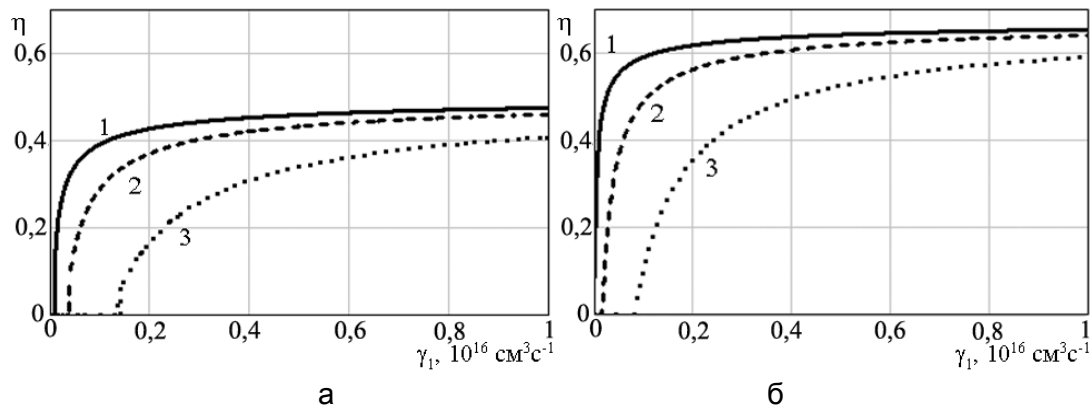


Рис. 3. Зависимость дифференциального КПД генерации от значения параметра апконверсии γ_1 при накачке на нижний лазерный уровень ${}^4I_{13/2}$ (а) и при накачке на верхний лазерный уровень ${}^4I_{11/2}$ (б). Скорость накачки $R=3,5 \cdot 10^{22}$ $\text{см}^3\text{с}^{-1}$. Линия 1 – $\gamma_2=0$, линия 2 – $\gamma_2=5 \cdot 10^{-17}$ $\text{см}^3\text{с}^{-1}$, линия 3 – $\gamma_2=10^{-16}$ $\text{см}^3\text{с}^{-1}$

На рис. 3 приведены графики зависимости дифференциального КПД генерации η Er:YLF-лазера от параметра апконверсии γ_1 при нескольких значениях параметра γ_2 для случая накачки на уровень ${}^4I_{13/2}$ (рис. 3, а) и на уровень ${}^4I_{11/2}$ (рис. 3, б). Расчеты проводились при скорости накачки $R=3,5 \cdot 10^{22}$ $\text{см}^3\text{с}^{-1}$, $k=k_1=k_2=1$. Приближение $k_1=k_2=1$ соответствует случаю мощной накачки, при которой велика интенсивность процесса самогашения с уровня ${}^4S_{9/2}$, в результате которого одновременно заселяются верхний (${}^4I_{11/2}$) и нижний (${}^4I_{13/2}$) лазерные уровни. Вредные потери для излучения в резонаторе считались равными нулю, а коэффициент отражения выходного зеркала подбирался таким, чтобы обеспечить максимальную мощность излучения генерации.

Из рис. 3 и рис. 4 видно, что процессы апконверсии с нижнего и верхнего лазерных уровней, интенсивность которых определяется значениями γ_1 и γ_2 , оказывают существенное влияние на эффективность лазерной генерации. Изменение параметров γ_1 и γ_2 наиболее заметно отражается на эффективности лазерной генерации в области значений параметра γ_1 от 10^{-19} $\text{см}^3\text{с}^{-1}$ до 10^{-17} $\text{см}^3\text{с}^{-1}$. В этой области увеличение параметра γ_1 приводит к значительному росту эффективности генерации, а увеличение γ_2 – к значительному уменьшению эффективности генерации вплоть до ее прекращения. В области больших значений параметра γ_1 его изменение, а также изменение γ_2 , сказываются на эффективности генерации не столь значительно. Начиная с некоторого значения параметра γ_1 , дифференциальный КПД генерации выходит на стационарный уровень (в данном случае при $\gamma_1 > 5 \cdot 10^{-17}$ $\text{см}^3\text{с}^{-1}$). В общем случае это значение γ_1 определяется параметрами накачки и потерь.

В случае накачки на нижний лазерный уровень при малых значениях параметра γ_1 генерация невозможна даже при мощной накачке, в то время как при накачке на верхний лазерный уровень генерация возможна и при нулевых значениях γ_1 и γ_2 . Интересно отметить, что величина параметра γ_2 незначительно влияет на пороговую скорость накачки.

Полученные соотношения также могут быть использованы для вычисления наибольшего значения эффективности генерации в Er:YLF. При скорости накачки

$R=3,5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$, что соответствует плотности мощности накачки 8 кВт/см^3 для накачки на верхний лазерный уровень и $4,7 \text{ кВт/см}^3$ для накачки на нижний лазерный уровень, максимальное значение дифференциального КПД η составит 68% при накачке на верхний лазерный уровень и 50% при накачке на нижний лазерный уровень. Эти значения дают верхнюю границу возможных значений дифференциального КПД, так как в процессе их вычисления не учитывались нерезонансные потери излучения в резонаторе. Для сравнения укажем, что в [10, 11] при накачке на уровень ${}^4I_{11/2}$ были получены значения дифференциального КПД генерации 40% и 35%. К сожалению, мы не располагаем значениями экспериментального дифференциального КПД генерации при накачке на уровень ${}^4I_{13/2}$.

Заключение

Предложенная в работе аналитическая модель позволяет рассчитать спектрально-энергетические параметры генерации эрбиевых лазеров с учетом процессов апконверсии с верхнего (${}^4I_{11/2}$) и нижнего (${}^4I_{13/2}$) лазерных уровней. Расчет пороговых скоростей накачки $R_{\text{пор}}$ для различных длин волн генерации в области 3 мкм показал, что в неселективном резонаторе в случае накачки на уровень ${}^4I_{11/2}$ наименьшим порогом генерации обладает излучение на длине волны 2,81 мкм, в то время как при накачке на нижний лазерный уровень ${}^4I_{13/2}$ – на длине волны 2,85 мкм. Разработанная модель также может быть использована для расчета характеристик непрерывной генерации других эрбиевых сред в области 3 мкм.

Литература

1. Rizolu I.M., DeShazer L.G., Eversole L.R. Soft Tissue Cutting With A Pulsed 30-Hz Er,Cr:YSGG Laser // SPIE. – 1995. – V. 2396. – P. 273–283.
2. Walsh L.J. The current status of laser applications in dentistry // Australian Dental Journal. – 2003. – V. 48. – № 3. – P. 146–155.
3. Clausen R., Huber G., Noginov M.A., Sarkisian G.K., Shcherbakov I.A., Smirnov V.A., Strange H.. Pumping of the YSGG:Er(3+) laser crystal due to ESA at the spectral range of about 0.8 micron // OSA Proceedings on Advanced Solid-State Lasers. – 1991. – V. 10. – P. 227–230.
4. Meister J., Franzen R., Apel Ch., Gutknecht N. Multireflection pumping concept for miniaturized diode-pumped solid-state lasers // Applied Optics. – 2004. – V. 43. – № 31. – P. 5864–5869.
5. Жеков В.И., Лобачев В.А., Мурина Т.М., Попов А.В., Прохоров А.М., Студеникин М.И. Генерация на кристаллах $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Er}^{3+}$ ($\lambda=2,94 \text{ мкм}$) при селективном возбуждении на нижний лазерный уровень // Квантовая электроника. – 1989. – Т. 16. – № 6. – С. 1138–1140.
6. Ткачук А.М., Разумова И.К., Мирзаева А.А., Малышев А.В., Гапонцев В.П. Упконверсия и заселение возбужденных уровней иона эрбия в кристаллах $\text{LiY}_{1-x}\text{Er}_x\text{F}_4$ ($x=0,003-1$) при непрерывной накачке излучением InGaAs-лазерных диодов // Оптика и спектроскопия. – 2002. – Т. 92. – № 1. – С. 73–88.
7. Тарасов Л.В. Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения. – М.: Радио и связь. 1981. – 400 с.
8. Labb'e C., Doualan J.-L., Girard S., Moncorg'e R., Thuau M. Absolute excited state absorption cross section measurements in $\text{Er}^{3+}:\text{LiYF}_4$ for laser applications around 2.8 μm and 551 nm // J. Phys.: Condens. Matter. – 2000. – V. 12. – P. 6943–6957.

9. Couto dos Santos M.A., Antic-Fidancev E., Gesland J.Y., Krupa J.C., Lemaitre-Blaise M., Porcher P.. Absorption and fluorescence of Er³⁺-doped LiYF₄: measurements and simulation // Journal of Alloys and Compounds. – 1998. – V. 275–277. – P. 435–441.
10. Pollnau M., Spring R., Wittwer S., Luthy W., Weber H.P.. Investigations on the slope efficiency of a pulsed 2.8-mm Er:LiYF₄ laser // J. Opt. Soc. Am. B. – 1997. – V. 14. – № 4. – P. 974–978.
11. Jensen T., Dening A., Huber G.. Investigation of diode-pumped 2.8-um Er:LiYF₄ lasers with various doping levels // Opt. Lett. – 1996. – V. 21. – № 8. – P. 585–587.

Сачков Дмитрий Юрьевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, dsachkov@gmail.com

УДК 004.3

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НАКОПЛЕНИЯ ОТКАЗОВ
КОММУНИКАЦИОННЫХ СРЕДСТВ НА СНИЖЕНИЕ
КОММУНИКАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОМПЬЮТЕРНЫХ
СИСТЕМ С РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ****В.А. Богатырев, Е.Ю. Котельникова**

Анализируется влияние накопления отказов сетевых адаптеров и магистралей (коммутаторов) на снижение коммуникационных возможностей типовых структур компьютерных систем с резервированием коммуникационных средств, оценено отрицательное влияние числа и комбинаторного расположения отказавших сетевых адаптеров на снижение производительности коммуникационной подсистемы.

Ключевые слова: отказоустойчивость, деградация, коммуникационная подсистема, среднее время пребывания запросов.

Введение

Высокая отказоустойчивость и производительность распределенных компьютерных, особенно управляющих, систем обеспечивается резервированием вычислительных и телекоммуникационных средств. Интенсивность снижения эффективности коммуникационной подсистемы зависит от числа и комбинаторного расположения отказавших сетевых адаптеров, связывающих компьютерные узлы с резервированными коммуникационными средствами (коммутаторами или магистралями).

Целью статьи является анализ влияния комбинаторного расположения отказавших сетевых адаптеров, связывающих компьютеры с резервированными коммуникационными средствами, на отказоустойчивость и снижение эффективности функционирования коммуникационной подсистемы.

**Типовые структуры компьютерных систем с резервированной
коммуникационной подсистемой**

Типовые структуры управляющих компьютерных систем предусматривают резервирование коммуникационной подсистемы, построенной на основе магистралей или коммутаторов. Структура компьютерной системы, содержащей m равноправных компьютерных узлов, объединенных через n магистралей, приведена на рис. 1, а, а через n коммутаторов – на рис. 1, б. Структура двухуровневой компьютерной системы (например, с выделением клиентских и серверных компьютеров) приведена на рис. 2. Подключение компьютерного узла к одной магистрали или порту коммутатора требует одного сетевого адаптера (СА).

Состояние рассматриваемых резервированных коммуникационных подсистем отображается матрицей $\|s_{ij}\|_{n \times m}$, элемент которой $s_{ij}=1$, если j -й узел способен к взаимодействию с i -й исправной магистралью (i -м коммутатором), т.е. осуществляющий соответствующее подключение адаптер исправен, в противном случае $s_{ij}=0$. В исходном состоянии при полном доступном подключении компьютерных узлов к магистралям (коммутаторам) все элементы матрицы $s_{ij}=1$. При неполнодоступном подключении или в результате отказов часть элементов матрицы могут быть нулевыми [1]. При отказе i -й магистрали (коммутатора) все элементы i -й строки равны нулю.

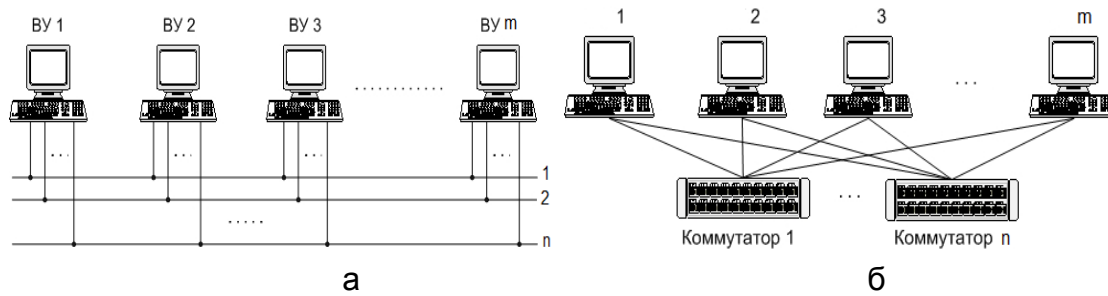


Рис. 1. Одноуровневая организация компьютерной системы: а – с резервированием магистралей, б – с резервированием коммутаторов

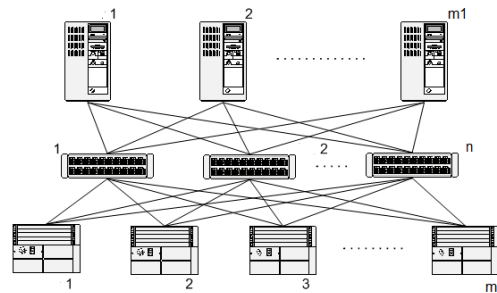


Рис. 2. Двухуровневая организация компьютерной системы

Постановка задачи

Работоспособность и эффективность состояний коммуникационной подсистемы зависят не только от числа отказавших адаптеров и магистралей, но и от их комбинаторного расположения. В статье проводится оценка влияния накопления отказов сетевых адаптеров и магистралей (коммутаторов) на снижение коммуникационных возможностей типовых структур компьютерных систем с резервированием коммуникационных средств. Ставится задача оценки отказоустойчивости и эффективности взаимосвязи компьютерных узлов через коммуникационную подсистему при возникновении различных комбинаций отказов сетевых адаптеров, отображаемых матрицей $\|s_{ij}\|$.

При беспriorитетной (циклической или случайной) дисциплине выбора магистралей для передачи оценивается влияние размещения отказавших адаптеров на сбалансированность загруженности различных магистралей и на среднее время пребывания запросов (пакетов) в коммуникационной подсети. Предполагается идентичность параметров всех однотипных коммуникационных средств и независимость их отказов. Функционирование компьютерных и коммуникационных узлов (коммутаторов или магистралей) представляется простейшими системами массового обслуживания типа $M/M/1$ с бесконечной очередью.

Условия работоспособности коммуникационной подсистемы

Для одноуровневых систем будем считать, что компьютерная система работоспособна, если между любой парой из m компьютерных узлов осуществима взаимосвязь хотя бы по одной из n магистралей для систем по рис. 1, а, или хотя бы через один коммутатор для систем по рис. 1, б. Для двухуровневых систем по рис. 2 условие работоспособности коммуникационной подсистемы заключается в обеспечении взаимосвязи между компьютерными узлами разных уровней (например, между рабочими станциями и серверами), причем взаимосвязь между компьютерными узлами одного уровня

не обязательна. Для одноуровневых вычислительных систем (рис. 1) взаимосвязь между a -м и b -м узлами поддерживается по i -ой магистрали, если сетевые адаптеры, связывающие с ней a -й и b -й узлы, исправны, т.е. имеется хотя бы одна строка матрицы $\|s_{ij}\|_{n \times m}$, у которой в a -м и b -м столбцах находятся единичные элементы.

Таким образом, для одноуровневых вычислительных систем признак отказа – возможность выделения в матрице $\|s_{ij}\|_{n \times m}$ подматрицы из двух столбцов (a -го и b -го), в каждой строке которой содержится не более одной единицы [9]. В этом случае отказ коммуникационной подсистемы возможен только после отказа $\zeta=n$ адаптеров. Максимальное число отказавших СА, при котором возможно сохранение функционирования системы, $\theta=(n-1)m$. Заметим, что при отказе $(n-1)m$ СА система работоспособна, если все m исправных СА подключены к одной из n магистралей.

Для двухуровневых вычислительных систем (рис. 2) выделим в матрице $\|s_{ij}\|_{n \times m}$ две подматрицы S_1 и S_2 (размерности $n \times m_1$ и $n \times m_2$, $m_1 + m_2 = m$), первая из которых отображает исправность адаптеров подключения к магистралям клиентов, а вторая – серверов.

Таким образом, для двухуровневых вычислительных систем признак отказа – возможность выделения в матрице $\|s_{ij}\|_{n \times m}$ подматрицы S_{12} из двух столбцов (a -го и b -го), один из которых принадлежит подматрице S_1 , а второй подматрице – S_2 , причем в каждой строке S_{12} содержится не более одной единицы [9].

Показатели отказоустойчивости коммуникационной подсистемы

Система показателей отказоустойчивости коммуникационной подсистемы должна отражать динамику сохранения эффективности при возникновении одного, двух или большего числа отказов СА.

Отказоустойчивость коммуникационной подсистемы характеризуют [2–5] следующие параметры: ζ – минимальное число и распределение отказов сетевых адаптеров и магистралей (коммутаторов), которое может привести к нарушению ее связности, т.е. к отказу коммуникационной подсистемы (ζ – число элементов, образующих минимальное сечение); θ – максимальное число отказов СА, при котором возможно сохранение работоспособности коммуникационной подсистемы.

Условная вероятность сохранения работоспособности (связанности) резервированной коммуникационной подсистемы при наличии s отказов СА и $N-n$ отказов магистралей (коммутаторов) вычисляется как $\beta_{sn} = N_s / C_{mn}^s$, где C_{mn}^s и N_s – общее число и число работоспособных состояний системы при условии возникновения s отказов СА ($s \leq \theta$) и целостности n магистралей (коммутаторов).

Среднее число выдерживаемых коммуникационной подсистемой отказов СА s^* при условии исправности n магистралей (коммутаторов) равно

$$s^* = \sum_{s=1}^{\theta} s(1-\beta_{sn})C_{mn}^s p^{nm-s} (1-p)^s,$$

где p – надежность (вероятность работоспособности) СА. Среднее число выдерживаемых коммуникационной подсистемой отказов СА S с учетом состояний при различной кратности отказов магистралей (коммутаторов) равно

$$S = \sum_{n=1}^N C_N^n p_0^n (1-p_0)^{N-n} \sum_{s=1}^{\theta} s(1-\beta_{sn})C_{mn}^s p^{nm-s} (1-p)^s,$$

где p_0 – надежность (вероятность работоспособности) одного коммутатора (магистрали).

Исследуемые системы относятся к категории сложных систем с множеством работоспособных состояний, обладающих различной эффективностью взаимосвязи, поэтому в качестве основного показателя надежности таких систем рекомендуется [4, 5] коэффициент сохранения эффективности $K_{эф}$. При расчете $K_{эф}$ каждому состоянию объекта, определенному совокупностью состояний его элементов (СА), сопоставляется доля сохраняемой номинальной эффективности от 0 до 1 [4]. Для коммуникационной подсистемы эффективность состояний определим величиной, обратной среднему времени пребывания в системе запросов на передачу кадров. В этом случае коэффициент сохранения эффективности определим как

$$K_{эф} = \sum_{n=1}^N C_N^n p_0^n (1-p_0)^{N-n} \sum_{s=1}^{\theta} E_{sn} \beta_{sn} C_{mn}^s p^{nm-s} (1-p)^s,$$

где $E_{sn} = w/w_{sn}$, а w и w_{sn} – соответственно среднее время пребывания кадров (запросов) в исходном состоянии системы (без отказов СА и магистралей) и в системе с отказом s СА и $N-n$ магистралей.

Условную вероятность сохранения работоспособности (связанности) резервированной коммуникационной при наличии s отказов СА и $(N-n)$ отказов магистралей (коммутаторов) для одноуровневых компьютерных систем можно приближенно вычислить на основе комбинаторного метода включения исключения [6–9]:

$$\beta_{sn} = 1 - \frac{C_{n(m-1)}^{s-n} (m + C_m^2 2^{n-1})}{C_{mn}^s}.$$

Оценка влияния накопления отказов на снижение эффективности коммуникационной подсистемы

Снижение эффективности функционирования по мере накопления отказов, выраженное как $E_{sn} = w/w_{sn}$, во многом определяется влиянием на среднее время пребывания запросов (кадров) несбалансированности каналов взаимосвязи, возникающей при существенной разнице числа исправных СА, подключенных к разным магистралям (коммутаторам).

Каждое состояние коммуникационной подсистемы представляется матрицей $\|s_{ij}\|_{n \times m}$, при этом среднее время пребывания запросов при распределении потока запросов по всем исправным магистралям определяется как

$$T_{sn} = \sum_{i=1}^n \frac{b_i v}{1 - b_i \lambda v},$$

где b_i – вероятность передачи кадра через i -ю магистраль (коммутатор), v – среднее время передачи кадра через магистраль, λ – интенсивности входного потока запросов на передачу кадров между компьютерами.

Зависимости доли сохранения эффективности относительно исходного состояния (при исправности всех коммуникационных средств) вычислим как

$$E_{sn} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{b_i v}{1 - b_i \lambda v} \right) / \left(\frac{v}{1 - \frac{\lambda v}{n}} \right).$$

Для одноуровневых вычислительных систем (рис. 1), содержащих m компьютеров и n магистралей (коммутаторов), вероятность передачи через i -ю магистраль составляет

$$b_i = C_{\sum_{j=1}^m s_{ij}}^2 / \sum_{i=1}^n C_{\sum_{j=1}^m s_{ij}}^2,$$

где числитель определяет число всевозможных пар компьютеров, связь между которыми возможна по i -й магистрали.

Для двухуровневых вычислительных систем (рис. 2) с n магистралями (коммутаторами), содержащих m компьютеров, в том числе m_1 клиентских и m_2 серверных узлов, вероятность передачи через i -ю магистраль равна

$$b_i = \left(\sum_{j=1}^{m_1} s_{ij} \right) \left(\sum_{j=m_1+1}^{m_2} s_{ij} \right) / \sum_{i=1}^n \left[\left(\sum_{j=1}^{m_1} s_{ij} \right) \left(\sum_{j=m_1+1}^{m_2} s_{ij} \right) \right],$$

а для двухуровневых компьютерных систем при серверах, подключенных к n магистралям (коммутаторам) через все исправные СА,

$$b_i = \sum_{j=1}^m s_{ij} / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m s_{ij}.$$

В последнем случае зависимостям среднего времени пребывания кадров от интенсивности входного потока λ при связанности клиентских компьютеров с магистралями, представленной матрицами S_1 вида

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

соответствуют кривые 1–3 на рис. 3 (подматрица S_2 содержит все единицы). Расчеты проведены при среднем времени передачи кадра $\nu=1$ с.

Зависимости доли сохранения эффективности E после отказов СА для второй и третьей матриц S_1 относительно исходного состояния при $\nu=1$ с представлены кривыми 2 и 1 на рис. 4.

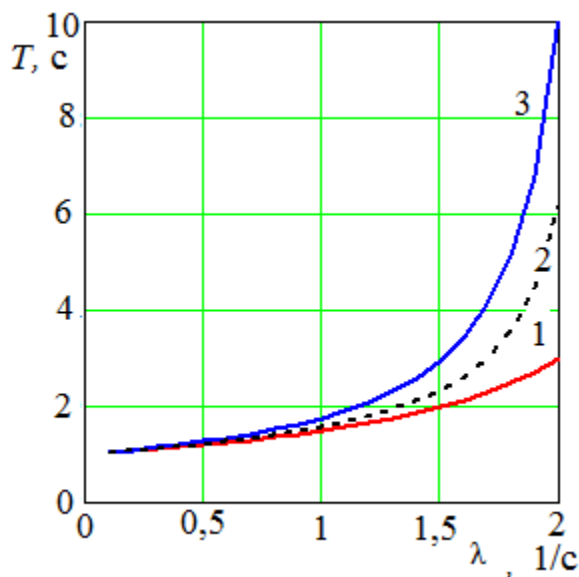


Рис. 3. Среднее время пребывания кадров в коммуникационной подсистеме

Из представленных на рис. 3 и 4 графиков следует, что при равномерном распределении единиц в матрице S (характеризующем расположение исправных СА) существенно повышается эффективность конфигурации (даже при одинаковом числе сохраненных СА), следовательно, при выборе структур с неполнодоступным подключением компьютеров к коммутаторам (магистралям) следует решать оптимизационную задачу.

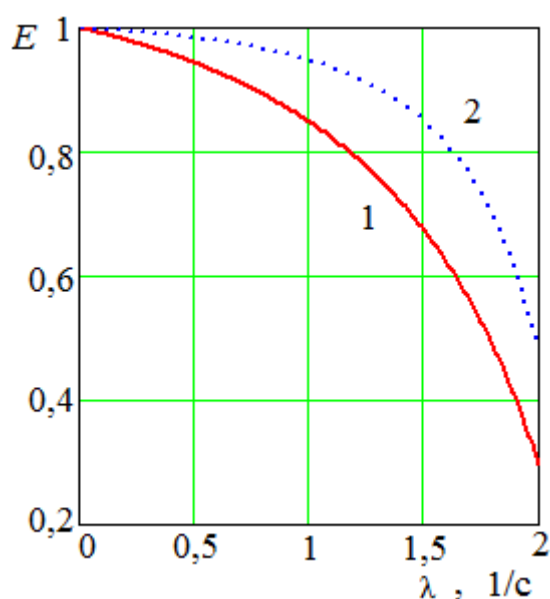


Рис. 4. Доля сохранения эффективности при отказах адаптеров относительно исходного состояния

Выводы

Оценено отрицательное влияние накопления отказов сетевых адаптеров и магистралей (коммутаторов) на снижение коммуникационных возможностей типовых структур компьютерных систем с резервированием коммуникационных средств.

Предложена оценка отрицательного влияния отказов сетевых адаптеров на сбалансированность коммуникационной системы, снижающую ее производительность, для одноуровневых и многоуровневых вычислительных систем в зависимости от взаиморасположения отказавших сетевых адаптеров.

Рассмотренные оценки рекомендуются к использованию при выборе протоколов взаимосвязи, обеспечивающих после возникновения отказов сетевых адаптеров сбалансированность нагрузки резервированной коммуникационной подсистемы.

Литература

1. Богатырев В.А. Отказоустойчивость и сохранение эффективности функционирования многомагистральных распределенных вычислительных систем // Информационные технологии. – 1999. – № 9. – С. 44–48.
2. Волик Б.Г. О дискуссии на IV Всесоюзном совещании «Надежность, живучесть и безопасность автоматизированных комплексов» // Приборы и системы управления. – 1989. – № 11. – С. 2–3.
3. Черкесов Г.Н. Методы и модели оценки живучести сложных систем. – М.: Знание, 1987. – 56 с.
4. ГОСТ 27.003-90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 27 с.
5. ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. – М.: Издательство стандартов, 1996. – 15 с.
6. Богатырев В.А. К оценке среднего времени ожидания передачи кадров через резервированный канал с ограниченными коммуникационными возможностями магистралей // Автоматика и вычислительная техника. – 1998. – № 1. – С.77–80.

7. Богатырев В.А. Комбинаторный метод оценки отказоустойчивости многомагистрального канала // Методы менеджмента качества. – 2000. – № 4. – С. 30–35.
8. Богатырев В.А. Комбинаторно-вероятностная оценка надежности и отказоустойчивости кластерных систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2006. – № 6. – С.21–26.
9. Богатырев В.А. Надежность и эффективность резервированных компьютерных сетей // Информационные технологии. – 2006. – № 9. – С. 25–30.

Богатырев Владимир Анатольевич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, Vladimir.bogatyrev@gmail.com

Котельникова Елена Юрьевна – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, elka842@yandex.ru.

УДК 519.179.2

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭВОЛЮЦИОНИРУЮЩИХ ПО ГЕНЕТИЧЕСКИМ АЛГОРИТМАМ СЕТЯХ

А.А. Короновский, А.А. Косицын, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов

Представлены результаты исследования кооперативных явлений в сетях со сложной топологией. Для моделирования процессов эволюции разработан генетический алгоритм эволюции сложных сетей. Проанализированы переходные процессы, наблюдающиеся в ходе эволюции. Обнаружены определенные закономерности при оптимизации сети.

Ключевые слова: сети со сложной топологией, генетический алгоритм, центральность, переходной процесс, перемежаемость.

Введение

Исследование кооперативных явлений в сетях со сложной топологией представляется в настоящее время одной из актуальных задач нелинейной динамики [1]. Интерес к подобным системам обусловлен, прежде всего, наличием большого числа объектов в природе и технике, которые можно описать с помощью сетевых моделей. Энергетические сети, железнодорожные сети, сети авиаперевозок, метро, всемирная сеть Интернет, социальные сети, сети соавторства, компьютерные сети – вот далеко не полный список объектов, к которым может быть применено понятие сети [2]. Понятно, что ни одна из вышеперечисленных сетей не является постоянной, характеристики каждой из них меняются с течением времени.

Поэтому в последнее время значительное внимание исследователей привлечено к изучению эволюционных процессов в сетях [3]. Эта проблема касается, прежде всего, биологических и экологических объектов, для которых понятие эволюции кажется очевидным. Большая часть систем в биологии и экологии эволюционирует по генетическим алгоритмам. Идея генетических алгоритмов состоит в организации эволюционного процесса, конечной целью которого является получение оптимального результата. Длительность эволюционных процессов является достаточно большой, а достижение оптимального результата зависит от ряда критериев. Понятно, что предсказание результата эволюции является нетривиальной задачей, поэтому возможна постановка задачи оптимизации тех или иных характеристик сети в процессе эволюции. На решение этой задачи как раз и направлена настоящая работа. В рамках исследования коопера-

тивных явлений в эволюционирующих сетях разработан генетический алгоритм эволюции сложных сетей и исследованы переходные процессы при эволюции.

Понятие сети и ее основные характеристики

Перед тем, как перейти непосредственно к описанию самого генетического алгоритма, введем в рассмотрение понятия сети и ее основных характеристик.

Традиционно под сетью понимается совокупность объектов, объединенных при помощи связей, причем каждый объект должен обладать определенными свойствами и содержать конкретную информацию [4]. Математическим образом сети является граф. Он не содержит никакой информации об элементах сети, а просто передает структуру ее связей. Считается, что любая система, предполагающая наличие дискретных состояний или наличие узлов и переходов между ними, может быть описана графом. Соединения между узлами графа называются ребрами.

Для математического описания графов обычно используют следующие понятия [5]. Во-первых, граф может быть рассмотрен как структура $G = (V, E)$, где V – множество вершин, E – множество ребер, причем ребра являются элементами вида $e = (v_i, v_j)$, где v_i, v_j принадлежат множеству вершин. Во-вторых, для его описания достаточно часто используется матрица смежности, представляющая собой квадратную матрицу, все элементы которой, лежащие на главной диагонали, равны нулю. В зависимости от того, является граф ориентированным или нет, матрица смежности будет несимметричной или симметричной. В рамках настоящей работы мы остановимся на рассмотрении неориентированных графов. В этом случае элемент матрицы смежности $S_{ij} = 1$, если существует ребро из i -ой в j -ую вершину, и $S_{ij} = 0$, если такого ребра нет.

Следует отметить, что приведенные выше понятия введены для так называемых невзвешенных графов (все ребра равноправны). Существует также понятие взвешенного графа [5], каждому ребру которого соответствует некий параметр – вес. Однако в данной работе взвешенные графы рассмотрены не будут.

Каждый узел сети характеризуется некоторой величиной k_i , называемой степенью узла (node degree) [2]. Степень узла – это количество связей у данного узла или, с математической точки зрения, сумма элементов в i -той строке (столбце) матрицы смежности S . Понятно, что не все узлы сети имеют одинаковое число ребер, поэтому для характеристики сети целесообразно ввести в рассмотрение совокупность степеней узлов или их распределение [2]. Для случайного графа такое распределение описывается распределением Пуассона. В то же время большинство реальных сетей подчиняется степенному распределению степеней узлов (scale-free networks, или свободно масштабируемые сети), известны также сети с экспоненциальным распределением степеней узлов [1, 2].

Далее в работе мы будем рассматривать случайные графы, предполагая, что именно с таких объектов начинается процесс эволюции. Предполагается интересным исследовать вопрос о трансформации топологии сети с течением времени в случае оптимизации ее по различным характеристикам: к каким качественным и количественным изменениям приведет этот процесс, в частности, как трансформируется распределение степеней узлов в данном случае?

Генетический алгоритм эволюции сложных сетей и его численная реализация

Для исследования эволюционных процессов в сложных сетях при помощи среды разработки GNU/Linux с использованием языков программирования C, C++ и GNU-утилиты make был разработан программный продукт, реализующий генетический алго-

ритм эволюции сложных сетей, суть которого заключается в следующем. Имеется популяция, состоящая из $M = 10$ отдельных сетей (графов), каждая из которых состоит из N элементов. Изначально генерируются $M/2$ случайных графов, состоящих из N узлов и связей $K = N \cdot p$, где $p = 0,05$ – заданная вероятность наличия связей в случайном графе. Для каждого из них считается характеристика α , по которой будет проводиться оптимизация.

Из построенных таким образом сетей случайным образом выбирается одна, для которой будет моделироваться дальнейший процесс эволюции. Предполагается, что на каждом шаге эволюции один из $M/2$ случайных графов начинает мутировать. При этом появляется $M/2$ дочерних графов, структура межэлементных связей которых отличается от исходной на заданную вероятность p . Для полученных сетей также считается оптимизируемая характеристика α . Из полученных таким образом M графов ($M/2$ исходных и $M/2$ дочерних) выбираются $M/2$ графов с лучшими значениями характеристики α . Остальные $M/2$ графов отбрасываются. Один из оставшихся графов, выбираемых случайным образом, снова начинает мутировать. Процесс продолжается до тех пор, пока не будет получена сеть с оптимальным значением характеристики α .

В роли оптимизируемой характеристики может выступать одна из таких величин, как центральность, уязвимость, кластеризация, синхронизируемость, кратчайшее расстояние между элементами сети и др. [5]. В рамках настоящей работы мы остановимся на процессе оптимизации сети по характеристике, называемой центральностью (в англоязычной литературе – *eigenvector centrality*). Эта величина характеризует важность элемента в структуре сети и используется, например, при осуществлении web-поиска в системе Google для упорядочивания информации [6]. С математической точки зрения центральность – это дисперсия σ распределения координат собственного вектора x матрицы смежности S , соответствующего максимальному значению собственного числа λ .

Для расчета собственных чисел матрицы смежности S использовался QR-алгоритм с неявным сдвигом (перенесен из библиотеки LAPACK с внесением изменений, касающихся специфики задачи) [7]. Принципиальными достоинствами этого метода являются возможности работы с матрицами произвольного вида, поиска не только действительных, но и комплексных собственных чисел, а также поиска собственных векторов. В то же время этот метод характеризуется рядом существенных недостатков, одним из которых является относительно низкая скорость расчета. Более того, возможно возникновение и других трудностей реализации алгоритма. В частности, процесс эволюции сети является достаточно длительным, причем величина переходного процесса, как было показано нами, растет с увеличением количества элементов сети согласно экспоненциальному закону (эти результаты будут описаны в следующем разделе). Процесс эволюции является последовательным, а, следовательно, не может быть распараллелен. Вычисление оптимизируемой характеристики, в частности, дисперсии σ распределения координат собственного вектора, соответствующего максимальному собственному числу λ , требует также значительных временных затрат, особенно для сетей больших размеров. В то же время вычисление оптимизируемой характеристики осуществляется $M/2=5$ раз на каждом шаге эволюции, что говорит о возможности распараллеливания процесса вычислений.

В настоящее время удалось оптимизировать процесс эволюции сложных сетей. В частности, применение средств оптимизации, имеющихся в компиляторах gcc, g++, icc, icpc вплоть до третьего уровня, позволило увеличить скорость расчета примерно в 4 раза. Кроме того, скорость расчета увеличилась еще на 25% за счет использования процедуры векторизации (в силу свойств компиляторов icc, icpc).

Основные результаты

Коротко остановимся на основных результатах, полученных при оптимизации алгоритма эволюции сложных сетей, касающихся, прежде всего, исследования переходных процессов, имеющих место в процессе эволюции. При проведении расчетов анализировались сети, состоящие из различного числа элементов $N \in [50; 1000]$. На рис. 1, а, представлены зависимости оптимизируемой характеристики (центральности σ) от шага эволюции для сетей различных размеров.

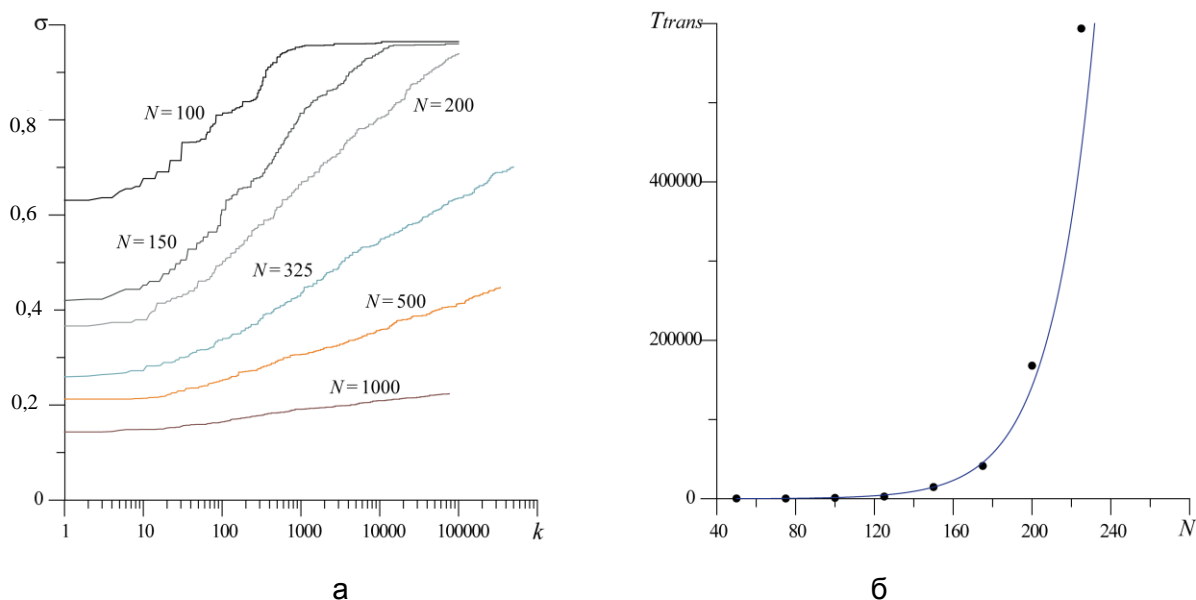


Рис. 1. Переходные процессы при эволюции сложных сетей: а – зависимость оптимизируемой характеристики от шага эволюции k для сетей из 100, 150, 200, 325, 500, 1000 элементов (в логарифмическом масштабе по оси абсцисс); б – зависимость времени выхода оптимизируемой характеристики на уровень насыщения от размера сети N (точки) и ее аппроксимация $T_{trans} = 16,37e^{0,045N}$ (сплошная линия)

Нетрудно заметить, что в процессе эволюции сети оптимизируемая характеристика меняется по логарифмическому закону, причем по завершении переходного процесса эта характеристика выходит на один и тот же уровень, независимо от размера сети. Указанная особенность позволяет определить длительность переходного процесса даже для тех сетей, процесс эволюции которых оказывается еще не завершенным. Зависимость длительности переходного процесса от размера сети представлена на рис. 1, б. Из рисунка видно, что величина переходного процесса растет с увеличением количества элементов сети по экспоненте (соответствующая аппроксимация показана сплошной линией).

Следует отметить, что в процессе эволюции сети оптимизируемая характеристика не меняется постоянно, а может оставаться неизменной в течение достаточно длительного промежутка времени. Интересным представляется вопрос о характере распределения длительностей участков, на которых оптимизируемая характеристика не меняется, в частности, прослеживается ли какая-либо закономерность в указанных распределениях или они оказываются различными для сетей разных размеров. На рис. 2, а, представлены распределения длительностей таких участков для сетей из $N = 100$, $N = 500$ и $N = 1000$ элементов и соответствующие аппроксимации. Видно, что независимо от размера сети подобные распределения подчиняются степенному закону с показателем степени «минус 1,5», характерным для перемежаемости типа «on-off» [8]. В этом случае

можно говорить, что обнаружен аналог перемежающегося поведения в процессе эволюции сложных сетей.

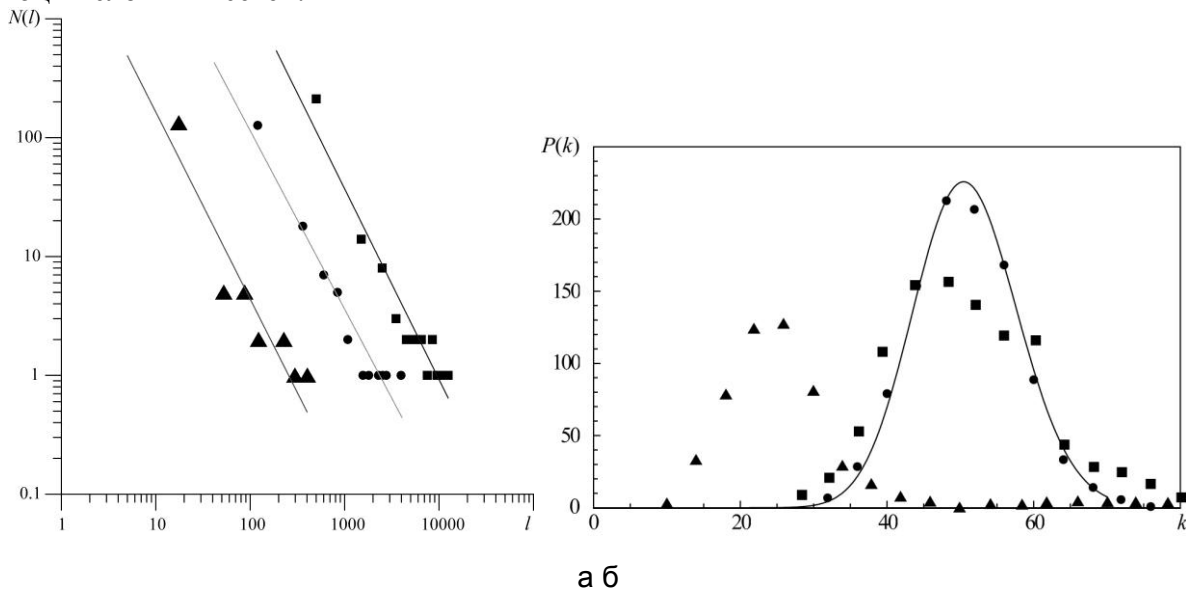


Рис. 2.. Распределения длительностей участков, на которых оптимизируемая характеристика не меняется, для сетей из 100 (▲), 500 (■) и 1000 (●) элементов и соответствующие аппроксимации $N(l) \sim l^{-1.5}$ (а).. Трансформация распределения степеней узлов сети из 1000 элементов в процессе эволюции: 0 шаг (●), 59814 шаг (■) и 74163 шаг (▲). Сплошной линией показана аппроксимация соответствующего распределения распределением Пуассона (б)

Не менее важным является вопрос о трансформации топологии сети в процессе эволюции. На рис. 2, б, представлены распределения степеней узлов сети из 1000 элементов на 0 (●), 59814 (■) и 74163 (▲) шагах эволюции. Эволюционный процесс, как отмечалось выше, начался со случайного графа, распределение степеней узлов которого подчиняется распределению Пуассона (показано на рисунке сплошной линией справа). Нетрудно заметить, что в процессе эволюции топология сети заметно трансформируется: из случайного графа получается сеть, характеристики которой сильно отличаются от характеристик случайной сети.

Заключение

В настоящей работе проведено исследование кооперативных явлений в сложных сетях, эволюционирующих по генетическому алгоритму. С этой целью разработан алгоритм эволюции сложных сетей и проведена его оптимизация, в результате которой удалось увеличить скорость расчета примерно в 5 раз. При помощи разработанного алгоритма исследованы также переходные процессы в ходе эволюции сложных сетей (в роли критерия отбора выступает оптимизация центральности сети). В то же время ряд результатов удалось получить только для сетей относительно малых размеров, что говорит о необходимости дальнейшей оптимизации алгоритма.

В ходе проведения исследований установлено, что вычисление оптимизируемой характеристики требует больших вычислительных мощностей и занимает много времени. Однако подобные вычисления осуществляются несколько раз на каждом шаге эволюции, что говорит о возможности распараллеливания вычислений.

Планируется проведение дальнейшей оптимизации алгоритма. Одним из наиболее существенных моментов в данном случае является замена алгоритма расчета собственных чисел и соответствующих им собственных векторов. Следует отметить, что ис-

пользуемый QR-алгоритм не принимает во внимание симметрию матрицы, что значительно замедляет расчет оптимизируемой характеристики (особенно для матриц достаточно больших размеров). Поэтому предполагается апробировать и использовать в дальнейшем один из следующих алгоритмов расчета собственных чисел симметричной матрицы: алгоритм с использованием LU-разложения прямоугольной матрицы (из библиотеки LAPACK), RRR-алгоритм (из библиотеки LAPACK), Sevd-алгоритм с использованием QL/QR алгоритма (из библиотеки BLAS). Вторым этапом в этом отношении является распараллеливание алгоритма, которое можно осуществить либо с использованием MKL для Intel C под Linux, либо с использованием библиотеки IMSL для GNU C и Intel C под Linux, либо средствами автоматического распараллеливания при помощи SunStudio, либо с использованием библиотек OpenMP и MPI.

Авторы выражают благодарность профессору С. Боккалетти за полезные обсуждения и критические замечания, а также доктору Д.У. Хвангу за помощь в реализации алгоритма.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (07-02-00044, 09-02-92421-КЭ), Президентской программы поддержки ведущих научных школ РФ (НШ-355.2008.2), молодых кандидатов (МК-465.2009.2) и докторов (МД-448.2009.2) наук, НОЦ «Нелинейная динамика и биофизика» при СГУ (CRDF REC-006), АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы», ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», а также ФНП «Династия» и МЦФФ.

Литература

1. Boccaletti S. Complex networks: Structure and dynamics / S. Boccaletti, V. Latora, V. Moreno, M. Chavez, D. U. Hwang // *Physics Reports*. – 2006. – V. 424. – P. 175–308.
2. Barabasi A. Statistical mechanics of complex networks / A. Barabasi, R. Albert // *Rev. Mod. Phys.* – 2002. – V. 74. – P. 47–97.
3. Dorogovtsev S.N. Evolution of networks / S.N. Dorogovtsev, J.F.F. Mendes. – Oxford University Press, 2003.
4. Nooy W. Exploratory Social Network Analysis with Pajek / W. Nooy, A. Mrvar, V. Batagelj. – Cambridge University Press, 2005.
5. Godsil C. Algebraic Graph Theory / C. Godsil, G. Royle. – New York: Springer-Verlag, 2001.
6. Newman M.E.J. The structure and function of complex networks / M. E. J. Newman // *SIAM Review*. – 2003. – V. 45. – P. 167–256.
7. Stoer J. Introduction to Numerical Analysis / J. Stoer, R. Burlisch. – New York: Springer Verlag, 1980.
8. Kim C. Mechanism of chaos synchronization and on-off intermittency / C. Kim // *Physical Review E*. – 1997. – V. 56. – № 3. – Part B. – P. 3697–3700.

Короновский Алексей Александрович – Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, доктор физ.-мат. наук, профессор, alkor@nonlin.sgu.ru

Косицын Андрей Александрович – Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, студент, kositzyn@gmail.com

Москаленко Ольга Игоревна – Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, кандидат физ.-мат. наук, ассистент, o.i.moskalenko@gmail.com

Храмов Александр Евгеньевич – Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, доктор физ.-мат. наук, профессор, aeh@nonlin.sgu.ru

УДК 004.627

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СЖАТИЯ АУДИОСИГНАЛОВ

Е.В. Пиуновский, А.А. Тропченко

Рассмотрены возможности и преимущества сжатия аудиоданных с применением вейвлет-преобразований. Выявлены проблемы существующих методов компрессии звука, проанализированы способы внедрения вейвлетов (wavelets) в алгоритмы сжатия, предложена схема сжатия аудиоданных на основе адаптивных ортогональных преобразований.

Ключевые слова: сжатие аудио, кодек, кодирование, вейвлет-преобразование, MPEG.

Введение

В последние десять лет можно наблюдать взрывной рост в использовании сети Интернет и мобильных телефонов, а сближение двух этих технологий открывает широкий диапазон новых возможностей на уже процветающем рынке мультимедиа. Эти возможности побуждают к проведению исследований, которые могут и должны выявить недостатки существующих методов обработки цифровых данных и показать пути их (методов) оптимизации для удовлетворения современных нужд рынка. В данном контексте очень большой интерес представляют вопросы сжатия звуковой информации, которые в настоящее время являются весьма актуальными, о чем говорят большое количество практических исследований и постоянная разработка и опубликование стандартов в этой области [1]. Но, несмотря на подобное внимание, распространенные алгоритмы сжатия аудиоданных все еще содержат ряд существенных недостатков [2], которые и описаны в данной статье. Очевидно, что для их устранения необходимо внедрение новых технологий в процесс компрессии звука. Одной из таких перспективных технологий являются вейвлет-преобразования (ВП).

По мнению исследователей, можно без преувеличения сказать, что вейвлеты (wavelets) произвели революцию в области теории и практики обработки нестационарных сигналов [3]. Вейвлет-функции уже достаточно долго используются в различных областях не только науки, но и техники, что связано с большими преимуществами, которые обещает их применение. Но некоторые возможности их приложения все еще вызывают вопросы о целесообразности и споры в научных сообществах. Одним из таких приложений является сжатие аудиоданных с использованием ВП. В данной статье рассматривается возможность применения ВП для обработки сигналов с целью их сжатия и выявляются достоинства такого подхода путем сравнения основных научных работ в данной области [4, 5] и анализа предлагаемых в них подходов к использованию ВП в процессе кодирования. В итоге, на основании проведенных исследований, предлагается структурная схема аудиокодека, включающего определенный вид ВП.

Сжатие аудиоданных: обобщенная схема и существующие проблемы

Сжатие аудиосигналов (АС) может быть осуществлено как без потерь (архивация), так и с потерями, причем в последнем случае кодирование можно подразделить на три вида [1–3]:

1. кодирование непосредственно реализации аудиосигнала (Wave Form Codec);
2. измерение, кодирование и передача на приемную сторону параметров АС, по которым уже на приемной стороне производится синтез этого (искусственного) АС. Такие системы называют вокодерными (Source Codec);
3. гибридные способы кодирования, т.е. сочетание первого и второго способов кодирования.

Кодеры формы волны аппроксимируют изменение сигнала во времени. Они требуют наибольших скоростей передачи, но имеют наилучшие показатели качества воспроизведенной речи.

В вокодерных системах моделируется процесс речеобразования человека. В коде-ре для аудиосигнала вычисляются определенные параметры, передаваемые к декодеру, в котором они применяются для восстановления формы исходного сигнала. Вокодерные преобразования отличаются наименьшими требованиями к полосе пропускания.

Один из способов повышения эффективности использования полосы пропускания состоит в применении гибридных методов, основанных на принципах линейного предсказания. В табл. 1 приведены данные по соответствию качества речи, MOS, задержек передачи и типов каналов, удовлетворяющих предъявленным требованиям [3].

| Качество | Лучшее | Хорошее | Среднее | Плохое | Стандарт |
|--------------|--------|---------|---------|--------|--------------------|
| MOS | > 4,5 | 4–4,5 | 3,5–4 | 3–3,5 | ITU-T P.800, P.830 |
| Задержка, мс | < 150 | < 250 | < 350 | < 450 | ETSI TS 101 329 |
| | < 150 | < 260 | < 400 | > 400 | ITU-T G.114 |

Таблица 1. Сравнительные характеристики гибридных методов

На рис. 1 изображены сглаженные зависимости оценок MOS от требований к битовой скорости потока, построенные по усредненным результатам исследований ITU Study Group 15 [2, 4].

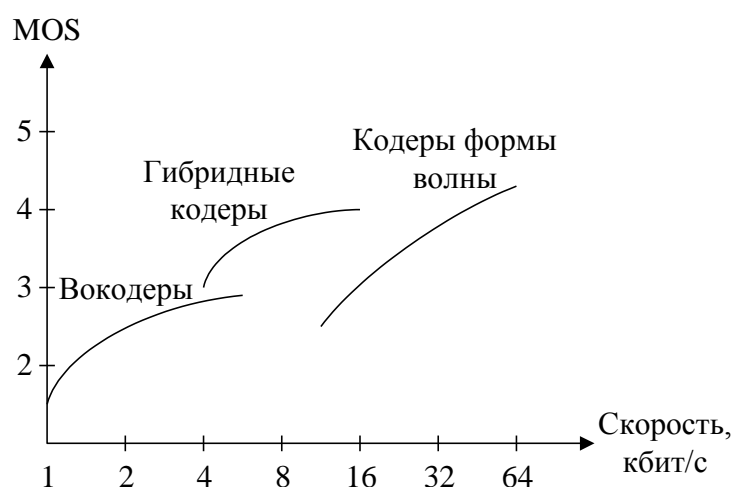


Рис. 1. Зависимость оценок MOS от скорости потока для кодеров формы волны, вокодеров и гибридных кодеров

В таблице 2 приведены сведения о характеристиках основных типов кодеков и используемых в них алгоритмах.

Несмотря на значительное разнообразие алгоритмов компрессии цифровых аудиоданных, структура кодера, реализующего такой алгоритм обработки сигналов, может быть представлена в виде обобщенной схемы, показанной на рис. 2. В блоке частотного и временного анализа исходный звуковой сигнал разделяется на субполосные (подполосные) составляющие и сегментируется по времени. Решение об изменении длины кодируемой выборки может принимать блок психоакустического анализа, в котором учитываются закономерности слухового восприятия звукового сигнала. В этом же блоке по специальной процедуре рассчитывается максимальный уровень искажений («шумов») квантования для каждого субполосного сигнала [1].

| Алгоритм компрессии аудиоданных | Метод компрессии | Скорость передачи, кбит/с на канал | Величина компрессии | Области применения |
|---------------------------------|--|--------------------------------------|--------------------------------|--|
| ASPEC | Кодирование с преобразованием | 64–192 | 1:6 | ISDN |
| ATRAC | Субполосное кодирование с преобразованием | 256 | 1:5 | MiniDisk |
| MUSCAM | Субполосное кодирование | 128–256 | 1:4 | DAB (Digital Audio Broadcasting) |
| MPEG-1, Layer 1 и Layer 2 | Субполосное кодирование (MUSICAM) | 32–448 (Layer 1) 32–384 (Layer 2) | 1:4 (Layer 1) 1:6 (Layer 2) | DAB (Layer 2, 128-256 кбит/с), DBS (Direct Broadcast Satellite, Layer 2, 224 кбит/с), DCC (Digital Compact Cassete, Layer 1, 384 кбит/с) |
| MPEG-1, Layer 3 | Субполосное кодирование с преобразованием | 32–320 | 1:9 | Internet-вещание |
| MPEG-2 | Субполосное кодирование/ субполосное кодирование с преобразованием | 32–384 | >1:9 | Многоканальное стереофоническое вещание |
| MPEG-2 AAC | Субполосное кодирование с преобразованием | 16–384 | 1:15 | Многоканальное стереофоническое вещание |
| MPEG-4 | Субполосное кодирование с преобразованием/ параметрическое кодирование | 2-64 | 1:20 | Мультимедиа приложения |
| Dolby AC-3 | Кодирование с преобразованием | 32–384 | 1:13 | Кинематограф, HDTV, спутниковое вещание |
| Гибридное | Субполосное кодирование с преобразованием/ параметрическое кодирование | 32–64 | 1:(15-20) | Радиовещание, хранение информации |

Таблица 2. Характеристики основных типов кодеков и используемых в них алгоритмов

Фактически можно выделить три основных этапа кодирования звука: фильтрация, применение психоакустической модели, квантование и кодирование. Реализациям практически каждого из этих этапов в существующих технологиях присущи определенные недостатки [2].

Так, в подавляющем большинстве алгоритмов во время фильтрации отсчеты сигнала делятся на субполосы (в алгоритме самого популярного на сегодняшний день формата MP3 (MPEG-1, Layer 3) их 32) равной ширины, что упрощает фильтры, но сильно контрастирует с особенностями слухового восприятия, которое зависит от частоты звука [2]. Кроме того, смежные фильтры должны идеально пропускать разные диапазоны частот. На практике они имеют существенное частотное перекрытие. Звук, состоящий из одного чистого тона, может попасть в два фильтра и породить сигналы (которые потом будут квантоваться) в две подполосы вместо одной [1].

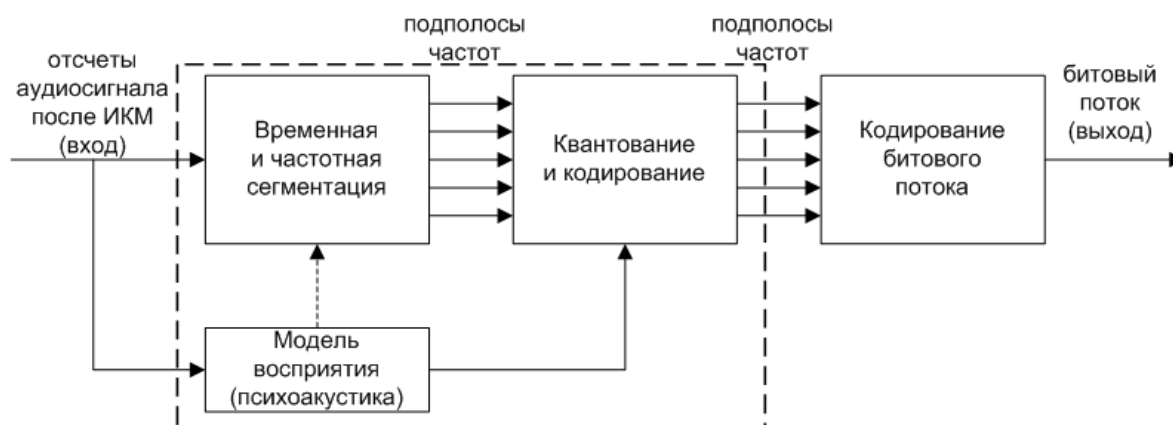


Рис. 2. Обобщенная структурная схема аудиокодера

Кроме того, традиционно используемое в алгоритмах модифицированное дискретное косинусное преобразование (МДКП) обеспечивает лучшее частотное разрешение, но одновременно, в силу принципа неопределенности, оно имеет более плохое временное разрешение. На практике это выражается в том, что квантование коэффициентов МДКП порождает ошибки, которые распределены во времени, и, кроме того, образует искажения, которые проявляются в виде предшествующего эха («пред-эха») [1].

Применяемая в настоящее время в распространенных алгоритмах психоакустическая модель, называемая NMR (Noise-to-Mask Ratio, «соотношение шум–маска») также не лишена недостатков [1]: в ней при расчете глобального (суммарного) порога маскировки учитываются лишь абсолютный порог слышимости и явление маскировки в частотной области, но игнорируются другие важные эффекты (такие, как маскировка во временной области и явление демаскировки сигналов).

Вейвлеты в кодировании звука

Перечисленные в предыдущем разделе недостатки говорят о необходимости применения новых технологий в области сжатия аудиоданных. Одной из перспективных технологий являются вейвлеты. В пользу возможности применения ВП в области кодирования звука говорят следующие факты:

- многократные заявления разработчиков кодека Vorbis, известного как Ogg Vorbis (Xiph.Org Foundation), о скором включении дискретного вейвлет-преобразования (ДВП) в процесс сжатия в данном формате;
- попытки применения вейвлетов для кодирования аудиосигналов (для разнообразных применений) фирмой Adapted Wave Technologies;
- поддержка Институтом инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers) исследований по разработке адаптивных вейвлет-кодеров для звуковых данных [5];
- наличие нескольких успешных разработок в области сжатия аудиоданных с помощью ВП на низких скоростях передачи битов (bit rates, битрейтах) [4, 5].

Два последних факта представляют особый интерес, так как в них представлены реальные результаты попыток внедрения вейвлетов в процесс кодирования аудиоданных, вейвлет-технологии, используемые в каждой из этих работ, различны, и оба этих исследования впоследствии послужили основанием для ряда научных статей в области нововведений в цифровой обработке звука. Результаты анализа исследований [4, 5] представлены в табл. 3.

| | | |
|--|---|--|
| Используемые преобразования и технологии | Прозрачное сжатие аудио на низких битрейтах с использованием адаптированных вейвлетов [4] | Сжатие аудио высокого качества с использованием адаптивной декомпозиции вейвлет-пакетов и психоакустической модели [5] |
| Вейвлет-технология (замена традиционному МДКП) | ДВП | Пакетное ДВП (ПДВП) |
| Базисная вейвлет-функция | Не указана (предлагается адаптивный подбор функции) | Биортогональный вейвлет (5-го порядка) |
| Психоакустическая модель | Упрощенная | Модифицированная психоакустическая модель 2 стандарта MPEG ISO/IEC 11172–3 |
| Дополнительные технологии | Устранение статистической избыточности с использованием динамического словаря | Алгоритм распределения бит на основе нуль-дерева |
| Способ проверки качества кодирования | Субъективное тестирование | Субъективное тестирование |
| Битрейт, на котором достигается прозрачное кодирование | 48–66 кбит/с (с применением дополнительных технологий); 64–70 кбит/с | 45 кбит/с |

Таблица 3. Сравнительные характеристики технологий сжатия звука на базе ВП

Комментируя результаты сравнения, представленные в таблице, необходимо уточнить, что под «прозрачным» кодированием понимается такое сжатие, при котором слушатель (участник «субъективного тестирования») не может отличить сжатый звуковой сигнал от оригинала (их качество кажется ему идентичным). Здесь сразу становится очевидной сложность процесса оценки качества сжатия аудиоинформации, ее субъективность. Но процесс тестирования представлен в рассмотренных работах весьма основательно, и для сравнения следует заметить, что разработчики формата MP3 заявляли о достижимости прозрачного кодирования при использовании соответствующего алгоритма лишь на битрейте, равном 128 кбит/с (и даже это заявление подвергается частой критике).

Как видно из таблицы, рассмотренные работы схожи по общему подходу к модификации процесса сжатия звука, но различаются реализацией отдельных его шагов. Отталкиваясь от того, что понятие «вейвлет», более всего нас интересующее, выделено даже в названиях обеих статей, можно отметить следующие общие недостатки, присутствующие данным исследованиям (именно при акцентировании внимания на ВП):

- использование дополнительных технологий (что мешает точному определению вклада вейвлетов в улучшение результатов сжатия);
- недостаточно глубокий подход к выбору ВП, используемого при кодировании.

В то же время можно заметить, что при подобной расстановке приоритетов и выделении представленных выше недостатков работа [5] является все же более предпочтительной: дополнительные технологии, применяемые в ней, заимствованы (и проверены другими исследователями), в ней осуществлен переход от ДВП к более сложным и эффективным ПДВП. Скорее всего, именно с этим и связан достигнутый в ней более высокий результат (низкий битрейт).

Применение адаптивных ортогональных преобразований для сжатия аудиоданных

Основываясь на результатах сравнения, приведенных в предыдущем разделе, и учитывая возможность применения адаптивных ортогональных преобразований [3], основанных на ВП, можно предложить модифицированную схему сжатия аудиоданных с использованием данных преобразований. В такой схеме кодирования звука основное

внимание уделено оптимизации этапа фильтрации – применению банков фильтров на основе адаптивных преобразований.

Следует отметить, что банки фильтров и вейвлет-преобразования являются весьма близкими понятиями. Фактически идея ДВП возникла на основе методов субполосного кодирования и может быть представлена в виде низкочастотных (НЧ) и высокочастотных (ВЧ) фильтров, применяемых к исходному сигналу. Но для более гибкого подхода к декомпозиции сигналов можно перейти к так называемым пакетам вейвлетов, где дальнейшему воздействию фильтров подвергается не только НЧ-компонента [3]. Настоящее же преимущество для фильтрации дают алгоритмы выбора последующего пути каскадирования сигнала. Существует три таких алгоритма: одиночное дерево (ПДВП), двойное дерево, частотно-временное дерево. Все они позволяют производить адаптивную фильтрацию; разницу же между ними удобно показать на результатах разбиения частотно-временной плоскости с их помощью [3], как представлено на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что адаптивный подход к ВП позволяет перейти от сигнально-независимых преобразований к адаптированным, позволяющим реализовывать произвольное разбиение частотно-временной плоскости [3], что дает огромное преимущество при кодировании реальных сигналов. Так, алгоритм одиночного дерева (вейвлет-пакеты) позволяет осуществить адаптацию в частотной области, алгоритм двойного дерева – сначала во временной, потом в частотной, а алгоритм частотно-временного дерева – одновременно в обеих областях [3]. Но, конечно, вместе с увеличением гибкости, возрастает и трудоемкость данных алгоритмов, что говорит о возможности использования каждого из них в зависимости от требований к процессу и результатам сжатия.

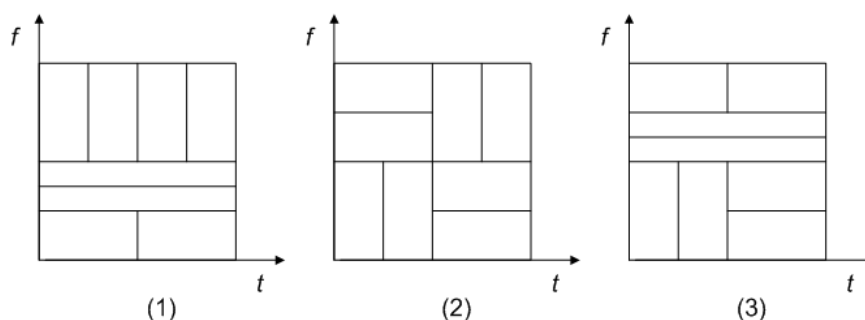


Рис. 3. Примеры разбиения, достигаемые алгоритмами:

1 – одиночного дерева; 2 – двойного дерева; 3 – частотно-временного дерева

Очевидно, что рассмотренные методы могут значительно улучшить процедуру временной и частотной сегментации звукового сигнала. Предлагаемый способ включения данных технологий в процесс кодирования аудиоданных показан на рис. 4.

К кодеру (схема которого расположена сверху) поступают данные о допустимой сложности вычислений (заранее сформированные и преобразованные к унифицированному виду), которые могут быть вычислены на основании условий, в которых выполняется сжатие, и требований, предъявляемым к его результатам. В зависимости от поступивших данных происходит выбор банка фильтров соответствующей сложности, основанного на одном из трех алгоритмов, рассмотренных выше. Кроме того, внутри кодера выходные данные блока психоакустического анализа также передаются к блоку фильтрации и служат функцией стоимости [3], на основе которой осуществляется преобразование (определяется наилучший путь по дереву). В таком случае осуществляется адаптивная фильтрация, при которой не только подбирается оптимальный базис разложения в пространственной и частотной областях, но также учитываются внешние ограничения на время и ресурсоемкость преобразования.

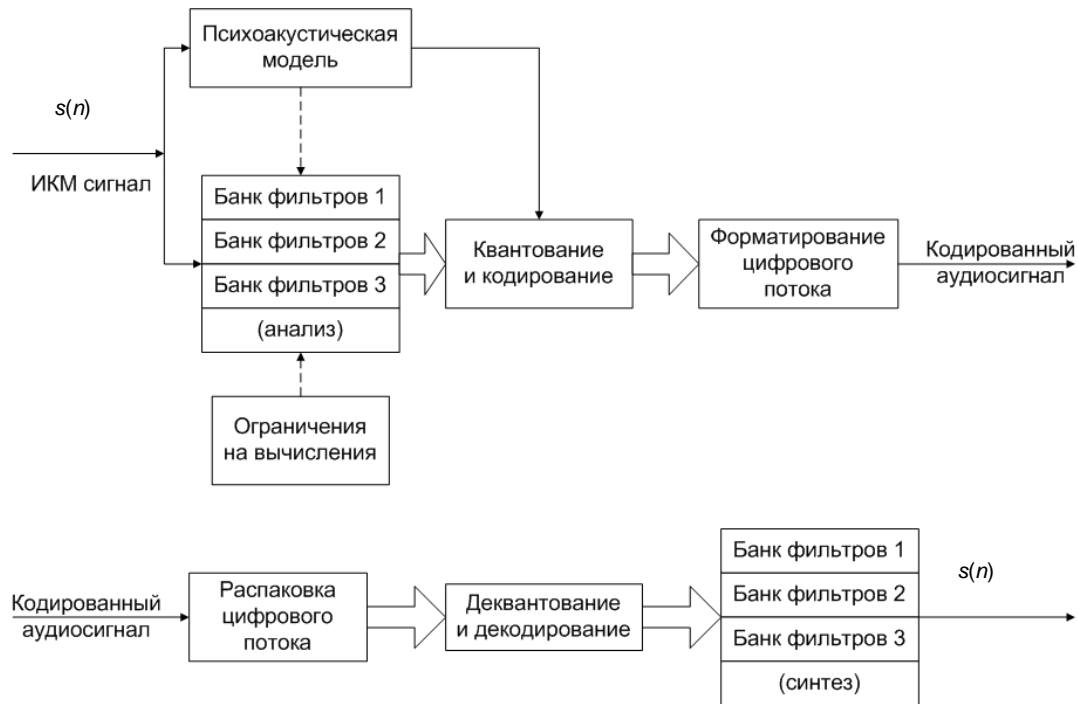


Рис. 4. Предлагаемая схема адаптивного аудиокодека

Заключение

Современные методы сжатия аудиоданных не лишены недостатков и поэтому могут быть улучшены. В статье были показаны основные проблемы распространенных алгоритмов кодирования звука. Также был проведен анализ двух успешных исследований, в которых была доказана возможность улучшения существующих технологий звуковой компрессии с помощью вейвлетов, являющихся одной из самых перспективных технологий в области цифровой обработки сигналов. В результате была предложена схема аудиокодека на основе адаптивных ортогональных преобразований, резко повышающих гибкость процесса кодирования.

Литература

1. Ковалгин Ю.А, Вологдин Э.И. Цифровое кодирование звуковых сигналов. – СПб: КОРОНА-принт, 2004. – 240 с.
2. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с.
3. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлет-преобразования. – СПб: Изд-во ВУС, 1999. – 208 с.
4. Sinha D., Tewfik A. Low Bit Rate Transparent Audio Compression Using Adapted Wavelets // IEEE Trans. ASSP. – December 1993. – V. 41. – № 12. –
5. Srinivasan P., Jamieson L. High Quality Audio Compression Using an Adaptive Wavelet Packet Decomposition and Psychoacoustic Modeling // IEEE Transactions on Signal Processing. – April 1998. – V. 46. – № 4.

Пиуновский Евгений Витальевич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, evgpiun@gmail.com
Тропченко Андрей Александрович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, zaika_98rus@mail.ru

УДК 004:616

ПАКЕТ ПОЛУФОРМАЛИЗОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ МОБИЛЬНОГО ТЕЛЕМЕДИЦИНСКОГО КОМПЛЕКСА

С.Л. Гольдштейн, Е.Н. Малышева

Статья посвящена созданию пакета полуформализованных моделей мобильного телемедицинского комплекса в виде концептуальных, структурных и алгоритмических моделей. Их описание представлено в состоянии «как должно быть». Цель моделирования – консалтинговая поддержка при разрешении проблемных ситуаций по организации медицинской помощи.

Ключевые слова: полуформализованные модели, мобильный телемедицинский комплекс.

Введение

Телемедицина – метод предоставления услуг по медицинскому обслуживанию там, где расстояние является критическим фактором [1]. Одним из направлений развития телемедицины являются мобильные телемедицинские комплексы (МТК) [2–4]. Известен МТК STEL TKmobile. Он содержит транспортное средство, приемо-передающее оборудование и водонепроницаемый чемодан [5, 6]. Известное устройство не обеспечивает сотрудникам служб скорой медицинской помощи (СМП) возможность опираться на системно-информационную поддержку в виде современных системно-интеллектуальных программных средств в случае типовых решений, что не может не сказываться на качестве оказания медицинской помощи больным на догоспитальном этапе.

В данной статье поставлена задача создания пакета полуформализованных моделей МТК в состоянии «как должно быть» (ТО ВЕ) с целью повышения качества оказания медицинской помощи больным на догоспитальном этапе за счет устранения недостатков и улучшения организации рабочего места сотрудников СМП.

Формализм концептуальных моделей

В развитие [7–10] концептуальное моделирование предложено реализовать в рамках следующего короткого формализма:

$$KM = \langle T_{km}, S_{km}, F_{km}, B_{km}; R \rangle, \quad (1)$$

где KM – концептуальная модель, T_{km} – типология, S_{km} – содержание, F_{km} – форма, B_{km} – вариант концептуальной модели соответственно;

$$T_{km} = \langle T_o, T_{бу}, T_m; R1 \rangle, \quad (2)$$

где индексы означают соответственно: о, бу, м – общее, базово-уровневое и модификационное описания. При этом общая концептуальная модель – инвариантное, не зависящее от времени и места описание; базово-уровневая – определение, соответствующее современному уровню науки и техники; модификационная – модель, имеющая конкретный объект приложения;

$$S_{km} = \langle C_f, C_p, C_s, C_n, C_c; R2 \rangle, \quad (3)$$

где индексы означают соответственно: ф – функции, п – путь реализации функций, с – структурная основа, н – направленность, ц – цель для определяемого (концептуально моделируемого) понятия;

$$F_{km} = \langle F_v, F_{vk}, F_{vs}, F_{vsk}, F_{vsko}; R3 \rangle, \quad (4)$$

где индексы означают соответственно: в, vk, vs, vsk, vsko – вербальная, вербально-курсивная, вербально-структурированная, вербально-структурированная с курсивным выделением, вербально-структурированная с курсивным выделением и оцифровкой;

$$B_{km} = \langle B1, B2; R4 \rangle, \quad (5)$$

где индексы 1, 2 соответствуют AS IS (как есть) и TO BE (как должно быть), R, R1–R4 – матрицы связи.

Концептуальные модели мобильного телемедицинского комплекса

Учитывая отсутствие системы знаний на уровне тезаурусных онтологий по МТК, а также с целью устранения недостатков по обеспечению сотрудников СМП системно-информационной поддержкой в виде современных системно-интеллектуальных программных средств в случае типовых решений, предложен пакет концептуальных моделей МТК (ТО-ВЕ), дополненный компьютерным чемоданом с системным интеллектуальным подсказчиком (СИП) и системой имитационного моделирования (ИМ). Прототипной формой служил материал [5–10].

Общая концептуальная модель МТК (ТО ВЕ) – сложный комплекс, выполняющий такие *группы функций*, как мобильная обработка информации, получение результатов первичной диагностики состояния пациента, помощи в постановке диагноза и в выборе тактики лечения на догоспитальном этапе, *путем* использования транспортного средства и приемо-передающего оборудования, занесения информации в соответствующие поля базы данных и выполнения определенных операций над данными, использования медицинской и компьютерной аппаратуры; на основе *структуры* из подсистем транспортного средства, приемо-передающего оборудования, водонепроницаемого и компьютерного чемоданов; *направленные* на облегчение, улучшение работы врача СМП с целью обеспечения более качественного обслуживания клиентов СМП и повышения прибыли.

Базово-уровневая концептуальная модель МТК (ТО ВЕ) – сложный комплекс, выполняющий следующие *группы функций*:

1) мобильные: 1.1) доставка комплекса в требуемый пункт, 1.2) использование комплекса в процессе перемещения в требуемый пункт;

2) обработка информации: 2.1) хранение, 2.2) редактирование, 2.3) фильтрация, 2.4) передача;

3) получение результатов первичной диагностики состояния пациента на догоспитальном этапе: 3.1) проведение первичной диагностики состояния пациента, 3.2) обработки результатов первичной диагностики состояния пациента, 3.3) хранение результатов первичной диагностики состояния пациента;

4) помощь в постановке диагноза и в выборе тактики лечения на догоспитальном этапе: 4.1) сравнения результатов первичной диагностики состояния пациента с образцами-результатами заболеваний, 4.2) поиск оптимального решения о предполагаемом заболевании и лечении, 4.3) получение высококвалифицированной помощи от другого специалиста СМП;

путем:

– для функций 1), 1.1), 1.2) – использования транспортного средства;

– для функций 2) – занесения информации в соответствующие поля базы данных и выполнения определенных операций над данными, использования приемо-передающего оборудования и компьютера: 2.1) использования памяти компьютера, 2.2) использования редакторов базы данных, 2.3) использования фильтров базы данных, 2.4) использования приемо-передающего оборудования и компьютера;

– для функций 3), 3.1) – использования медицинской аппаратуры, 3.2) – использования редакторов исследований, 3.3) – использования памяти компьютера;

– для функций 4) – использования компьютерной аппаратуры, 4.1) – использования шифратора и блока сопоставления, 4.2) – использования СИП и системы ИМ, 4.3) – проведения телеконсультаций;

на основе *структуры* из подсистем:

– для функций и путей 1), 1.1), 1.2) – транспортного средства;

- для функций и путей 2), 2.1), 2.2), 2.3) – водонепроницаемого чемодана (компактного компьютера);
- для функций и путей 3), 3.1) – водонепроницаемого чемодана (компьютерного электрокардиографа, электронного термометра, компьютерного спирографа, пульсоксиметра, пульсометра, глюкометра, автоматического тонометра), 3.2), 3.3) – водонепроницаемого чемодана (компактного компьютера);
- для функций и путей 4) – водонепроницаемого и компьютерного чемоданов: 4.1) водонепроницаемого чемодана (компактного компьютера), 4.2) компьютерного чемодана (СИП и системы ИМ), 4.3) приемо-передающего оборудования и водонепроницаемого чемодана (компактного компьютера, компьютерной периферии, встроенной аппаратной системы видеоконференцсвязи с LCD телевизором, видеокамеры и микрофона);

направленные на облегчение, улучшение работы врача СМП: для пациента – обеспечение наглядности исходных ситуаций, проводимых работ, полученных результатов, повышение качества и комфортности лечения; для врача СМП – проведение лечения на высоком профессиональном уровне, поиск оптимальных решений и исключение ошибок в постановке диагнозов и назначение эффективного лечения; для руководителей – контроль деятельности персонала, получение прибыли от внедрения современных технологий, поднятие престижа медицинского учреждения;

с целью обеспечения более качественного обслуживания клиентов СМП и увеличения прибыли за счет удовлетворения потребностей клиентов СМП в качественном лечении и привлечения новых клиентов за счет использования новых технологий.

Структурная и алгоритмическая модели мобильного телемедицинского комплекса

Предложены структурная и алгоритмическая модели МТК (ТО ВЕ) (рис. 1, 2). Модели улучшены за счет добавления компьютерного чемодана с СИП и системой ИМ. Прототипной формой служил материал [5, 6, 9, 11–15].

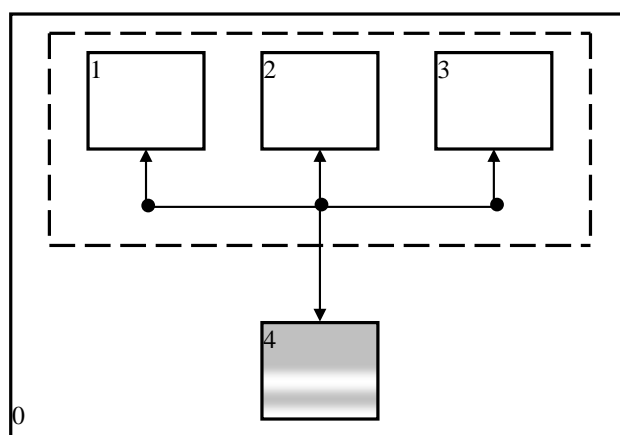


Рис. 1. Структурная модель МТК (ТО ВЕ): 0 – МТК; подсистемы: 1 – транспортного средства, 2 – приемо-передающего оборудования, 3 – водонепроницаемого чемодана (компактный компьютер – БД, шифратор, блок сопоставления, жесткий диск; компьютерная периферия, встроенная аппаратная система видеоконференц-связи с LCD телевизором, видеокамера и микрофон, компьютерный электрокардиограф, электронный термометр, компьютерный спирограф, пульсоксиметр, пульсометр, глюкометр, автоматический тонометр); 4 – компьютерного чемодана (СИП и система ИМ)

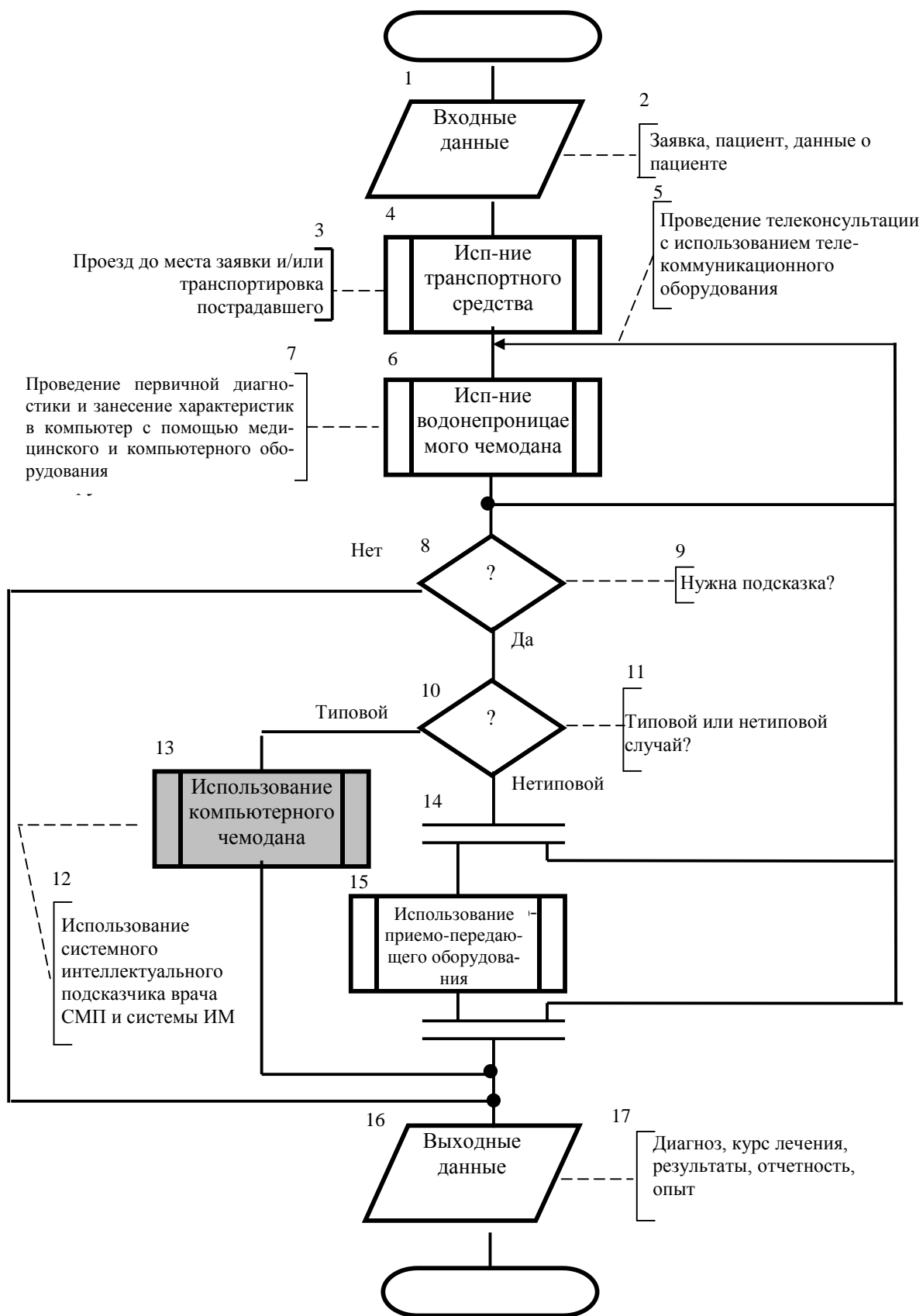


Рис. 2. Алгоритмическая модель МТК (ТО ВЕ)

Заключение

Предложен пакет полужформализованных моделей мобильного телемедицинского комплекса в составе общей и базово-уровневой концептуальных моделей, структурной и алгоритмической моделей. Полученный пакет призван быть маршрутизатором для дальнейшего функционально-структурного, критериального и т.п. моделирования.

Литература

1. Stolyar V., Atkov O., Selkov L., Selkova E. Nine-years experience in telemedicine for rural and remote districts of Russia // Ukrainian Journal of Telemedicine and Medical Telematics. – 2005. – Vol. 2. – P. 20–27.
2. Chakraborty A. The smart cap – a tele-warning device for the epilepsy patients using GPS and embedded systems // Ukrainian Journal of Telemedicine and Medical Telematics. – 2005. – Vol. 2. – P. 56–63.
3. Senkevich Yu.I. Experience of creation and development of extreme telemedicine system in Antarctic. Part II // Ukrainian Journal of Telemedicine and Medical Telematics. – 2005. – Vol. 2. – P. 40–48.
4. Владзимирский А.В., Климовицкий В.Г., Калиновский Д.К., Павлович Р.В., Сметанников М.Ю., Крутько Р.Л. Оборудование для телемедицинской деятельности лечебно-профилактических учреждений. Методические рекомендации. – Донецк: ООО «Цифровая типография», 2007. – 46 с.
5. Переведенцев О.В. Мобильный телемедицинский комплекс STEL TKm [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.medlinks.ru/article.php?sid=15533> (дата обращения 02.07.2009), свободный.
6. Мобильный телемедицинский комплекс STEL ТКМ // Medtech. Медицинская техника и технологии [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.ecolab.medtech.com.ua/index.php?mod=indarticles&sid=24&id=216 (дата обращения 02.07.2009), свободный.
7. Гольдштейн С.Л., Ткаченко Т.Я. Введение в системологию и системотехнику. – Екатеринбург: ИРРО, 1994. – 198 с.
8. Коробейников Е.В., Гольдштейн С.Л. Стратегическая деятельность холдинговой компании в информационно-экономической сфере на примере ЗАО «АТОМПРОМКОМПЛЕКС»: пакет концептуальных моделей // Интеллектуальные информационные технологии в управленческой деятельности / Под ред. С.Л. Гольдштейна. – Екатеринбург, 2001. – С. 109–117.
9. Блохина С.И., Свинина Н.А., Печёркин С.С., Репина З.А., Козлова В.П., Гольдштейн С.Л. Концептуальные и алгоритмические модели деятельности логопеда // ИНФОР «БОНУМ». – 2000. – № 1 (5). – С. 54–75.
10. Гольдштейн С.Л., Московских В.А. Пакет концептуальных моделей деятельности на рынке гражданского строительства // Интеллектика, логистика, системология. – Вып. 17 / Под ред. В.В. Ерофеева. – Челябинск, 2006. – С. 57–82.
11. Гольдштейн С.Л., Еремеева М.А. Порталы: обзор, аналитика, аналоги, прототип // Системная интеграция в управленческой деятельности. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2002. – С. 78.
12. Гольдштейн С.Л., Инюшкина О.Г., Макаров Э.П. Научно-образовательный портал: обзор, аналоги, прототип // Системная интеграция в управленческой деятельности. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2002. – С. 99–113.
13. Ткаченко Т.Я. Инструментальная среда системотехнического обслуживания сложных объектов. – Екатеринбург: ГОУ УГТУ–УПИ, 2002. – 203 с.

14. Печёркин С.С., Кабанова С.В., Гольдштейн С.Л. Проблематика моделирования, развития и применения инструментария системной интеграции для научно-практических структур: обзор, аналоги, прототип // Системная интеграция в управленческой деятельности / Под ред. С.Л. Гольдштейна. – Екатеринбург, 2002. – С. 10–64.
15. Гольдштейн С.Л., Кулигин В.А. Пакет алгоритмических моделей жизненного цикла топ-менеджмента комплексного промышленного строительства // Интеллектика, логистика, системология. Вып. 17 / Под ред. В.В. Ерофеева. – Челябинск, 2006. – С. 57–82.

- Гольдштейн Сергей Львович* – Уральский государственный технический университет – УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, vtsl@dpt.ustu.ru
- Малышева Екатерина Николаевна* – Уральский государственный технический университет – УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, аспирант, katyona@bk.ru

УДК 681.5 + 531

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ
ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕНЗОРОВ ИНЕРЦИИ ТЕЛ**

В.Г. Мельников

Представлен метод определения шести инерционных параметров твердого тела в условиях неизвестной диссипации энергии, применяемый на его полупрограммном сферическом движении частного вида – неравномерной прецессии. Движение содержит этапы свободного неуправляемого торможения и управляемого обратного симметричного ускоренного движения по программе, рассчитанной по замерам предыдущего движения. Расчет инерционных параметров выполняется по замерам потребляемой электроэнергии. Предложено исполнительное робототехническое устройство.

Ключевые слова: тензор инерции, параметрическая идентификация, реверсивно-симметричное сферическое движение, полупрограммная прецессия.

Введение

Точность экспериментального определения моментов и тензоров инерции существенно зависит от величины диссипации энергии через трение в устройстве и через сопротивление среды. В связи с этим обычно ограничиваются применением устройств с малым трением, с мультиплярными, торсионными и пружинными подвесами, газовыми подшипниками [1–5]. Применяют непосредственное определение сил, приложенных к телу, путем замеров упругих деформаций податливой платформы, тем самым исключая из рассмотрения сложное исполнительное устройство, но получая существенные погрешности от деформаций конструкции [6]. Применение теоремы моментов позволяет исключить из расчетных формул влияние на точность только сил внутреннего трения [7–8], в то же время не исключается отрицательное влияние внешних диссипативных сил. В [9–13] предложен метод идентификации осевых моментов инерции тел, согласно которому проблема борьбы с отрицательным влиянием диссипации на точность сведена к проблеме точного исполнения программных тестовых симметричных движений.

В статье предлагается модифицированный метод параметрической идентификации матрицы тензора инерции, по которому вместо шести программных осевых реверсивно-симметричных вращений применено одно полупрограммное реверсивно-симметричное сферическое движение тела с одной обобщенной координатой – углом прецессии либо углом нутации, содержащее этап свободного непрограммного торможения, переходящего после реверса в этап программного обратного ускоренного движения на прежнем угловом интервале, согласованного с прежним этапом по свойству обратной реверсивной симметрии. Преимущество метода заключается в большей точности идентификации и быстродействии, поскольку вместо шести экспериментов с шестью выставками тела в шесть угловых положений выполняется только один эксперимент, кроме того, технически сложные замеры крутящего момента здесь заменены на текущие замеры расхода электроэнергии. Предложено исполнительное устройство с двухосным кардановым подвесом с одним электродвигателем и с упругим торсионным элементом.

Определения

Пусть тело размещено во внутренней осесимметричной цилиндрической рамке 1 двухосного карданова подвеса (см. рисунок) с горизонтальной осью собственного вра-

щения Oz и внешней рамки 2 с вертикальной осью прецессии Oz_1 , соосной с торсионном 3 и ротором электродвигателя 4. Планетарный механизм 5 передает вращение на внутреннюю рамку согласно уравнению голономной связи углов прецессии и собственного вращения вида $\psi = \lambda\varphi$ при $\lambda = 1,235 = \text{tg}\beta = \text{tg}51^\circ$. Положение голономной системы тело – устройство с одной степенью свободы задаем обобщенной координатой φ . На двухоборотном угловом интервале $[\varphi_0 = 0, \varphi_{10} = 4\pi]$ введем промежуточные узлы $[\varphi_1 = h, \varphi_2 = 2h, \dots, \varphi_9 = 9h]$, где $h = 2\pi/5$.

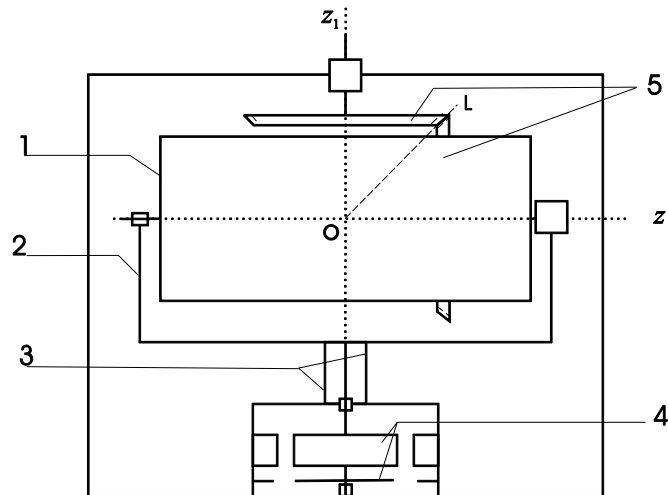


Рисунок. Исполнительное устройство

Реверсивной полупрограммной прецессией назовем сферическое двухосное движение тела с голономной связью $\psi = \lambda\varphi$, состоящее из замедленного двухоборотного непрограммного вращения по φ с уравнением, определяемым по текущим замерам движения в виде

$$\varphi = p(t) \quad \text{при} \quad \varphi \in [\varphi_0 = 0, \varphi_{10} = 4\pi], \quad t \in [t_0, t_{10}], \quad (1)$$

переходящее после реверса с некоторого момента $t'_{10} \geq t_{10}$ в обратное программное симметричное движение на интервале времени $[t'_{10}, t'_0]$ при $t'_0 = t'_{10} + t_{10} - t_0$, удовлетворяющее уравнению

$$\varphi = f(t) \quad \text{при} \quad f(t) = p(t^*), \quad t^* = t'_{10} + t_{10} - t. \quad (2)$$

Динамические уравнения энергии прецессионного движения

Применим теорему об изменении кинетической энергии к системе тело–устройство (рисунок) на полнооборотных пересекающихся угловых интервалах $\Phi_i = [\varphi_i, \varphi_{i+5}]$ при $i = 1, \dots, 5$. Учитывая равенство нулю работы силы тяжести тела на полных оборотах по φ независимо от ψ и симметричность движений, получаем:

$$\begin{aligned} T_{i+5} - T_i &= \Pi_i - \Pi_{i+5} + A_i + B_i + V_i, \quad i = 1, \dots, 5; \\ T_i - T_{i+5} &= \Pi_{i+5} - \Pi_i + A'_i + B'_i + V'_i, \quad B'_i = B_i, V'_i = V_i + \varepsilon_i^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь T_i и Π_i – узловые значения кинетической энергии системы и потенциальной энергии торсионна, A_i, A'_i – работы момента электродвигателя на интервале Φ_i тормозного и обратного движений, B_i, B'_i – работы внутреннего трения в торсионне и

сил сопротивления среды, одинаковые при цилиндрической форме кожуха, V_i, V_i' – работы сил трения в устройстве, в том числе в подшипниках электродвигателя, которые могут отличаться на положительную величину ε_i^2 в случае малого трения порядка ε_i . Из уравнений (3) получаем десять уравнений для работ сил и кинетических энергий:

$$A'_i + A_i = 2 |B_i + V_i| - \varepsilon_i^2, \quad 2T_i - 2T_{i+5} = 2\Pi_{i+5} - 2\Pi_i + A'_i - A_i + \varepsilon_i^2. \quad (4)$$

В случае $A_i = 0$, когда тормозное движение выполняется при выключенном электродвигателе, получаем $A'_i = 2 |B_i + V_i| - \varepsilon_i^2$, т.е. на обратном движении управляющий момент электродвигателя работает в маломощном режиме компенсации малой диссипации, следовательно, $\varepsilon_i^2 \approx 0$. Если вместо передаточного механизма применен второй электродвигатель, соосный с валом внутренней рамки, также имеем $\varepsilon^2 = 0$. Угловая скорость сферического двухосного движения $\bar{\omega} = \dot{\varphi} \bar{k} + \dot{\psi} \bar{k}_1 = \mu \Omega \bar{e}$ при $\mu = \sqrt{1+\lambda} = 1,5890$, где $\bar{k}, \bar{k}_1, \bar{e}$ – орты осей Oz, Oz_1 и мгновенной оси OL . Кинетическая энергия тела $T = J(\varphi) \mu^2 \Omega^2 / 2$, где $J(\varphi)$ – момент инерции тела относительно OL , $J \mu^2$ – приведенный момент инерции тела. Для цилиндрической рамки имеем $T = I \mu^2 \Omega^2 / 2$, где $I = \text{const}$ – момент инерции рамки относительно OL . Подставляя выражение кинетической энергии системы в уравнения (4), получим:

$$(J \mu^2 + I)(\Omega_i^2 - \Omega_{i+5}^2) = 2\Pi_{i+5} - 2\Pi_i + A'_i - A_i + \varepsilon_i^2, \quad J_i = J(\varphi_i) = J(\varphi_{i+5}).$$

Расчетные формулы для моментов инерции тела

Находим расчетные формулы моментов инерции тела относительно пяти мгновенных осей, равномерно распределенных в теле по круговому конусу с углом $\beta = 51^\circ$ между образующей OL и собственной осью Oz :

$$J_i = (A'_i - A_i + 2\Pi_{i+5} - 2\Pi_i + \varepsilon_i^2)(\Omega_i^2 - \Omega_{i+5}^2)^{-2} \mu^{-2} - I \mu^{-2}, \quad i = 1, \dots, 5. \quad (5)$$

Шестой момент инерции тела определяется на реверсивно-симметричном вращении системы вокруг неподвижной оси Oz_1 при угле $\varphi = 0^\circ$ на конечном угле поворота $[\psi_1, \psi_2]$ по формуле

$$J_6 = J_{z1} = (A'_{21} - A_{12} + 2\Pi(\psi_2) - 2\Pi(\psi_1))(\dot{\psi}_1^2 - \dot{\psi}_2^2)^{-2} - I_{z1}, \quad (6)$$

где J_{z1} и I_{z1} – осевые моменты инерции тела и устройства при $\varphi \equiv 0$. Единое твердое тело, вращающееся вокруг неподвижной вертикальной оси, оказывает динамическое давление на подшипники, не зависящее от направления вращения, поэтому в (6) принимаем $\varepsilon_6^2 = 0$. Работа крутящего момента электродвигателя равна потребляемой им электроэнергии E_i за вычетом омических тепловых потерь в обмотках δ_i , в которые включаем и расходы на приращение энергии электромагнитного поля $A_i = E_i - \delta_i$, $A'_i = E'_i - \delta'_i$. Отсюда

$$A'_i - A_i = E'_i - E_i - (\delta'_i - \delta_i), \quad A'_{21} - A_{12} = E'_{21} - E_{12} - (\delta' - \delta). \quad (7)$$

В результате осевые моменты инерции определены формулами (5)–(6), где разности работ активного момента электродвигателя определяются формулами (7) через разности расходов электроэнергии и разности омических потерь.

Расчетные формулы для матрицы тензора инерции

Моменты инерции тела относительно осей связаны с элементами тензора инерции – осевыми декартовыми и центробежными моментами инерции – следующими формулами:

$$J_i = \mathbf{I}\mathbf{U}_i, \quad i = 1, \dots, 5 \quad \text{при} \quad \mathbf{I} = [J_x \ J_y \ J_z \ J_{xy} \ J_{yz} \ J_{xz}],$$

$$\mathbf{U}_i = [e_{i1}^2, e_{i2}^2, e_{i3}^2, 2e_{i1}e_{i2}, 2e_{i2}e_{i3}, 2e_{i1}e_{i3}]^T.$$

Здесь e_{ix}, e_{iy}, e_{iz} – проекции ортов осей, равные направляющим косинусам осей. Горизонтальная конкатенация этих выражений приводит к матричному выражению вектор-строки осевых моментов инерции через вектор-строку элементов тензора инерции, умноженную на квадратную матрицу перехода:

$$\mathbf{J} = \mathbf{I}\mathbf{U} \quad \text{при} \quad \mathbf{J} = [J_1, \dots, J_6], \quad \mathbf{U} = [U_1, \dots, U_6].$$

Отсюда получаем расчетную формулу для вектор-строки, составленной из моментов инерции относительно декартовых осей и центробежных моментов инерции:

$$\mathbf{I} = \mathbf{J}\mathbf{U}^{-1} \quad \text{или} \quad \mathbf{I}^T = (\mathbf{U}^{-1})^T \mathbf{J}^T. \quad (8)$$

Для вышеуказанного пучка из шести осей имеем следующие вектор-строки ортов:

$$\mathbf{e}_i = \sin \beta [\cos(i\varphi - \varphi), \sin(i\varphi - \varphi), \text{ctg} \beta], \quad i = 1, \dots, 5; \quad \mathbf{e}_6 = [1, 0, 0]$$

Решение (8) хорошо обусловлено, поскольку $\det(\mathbf{U}) = 0,9657$.

Заключение

В статье излагается обобщение метода идентификации шести компонент тензора инерции твердого тела. Предложено вместо пяти программных тестирующих реверсивно-симметричных вращений вокруг неподвижных осей использовать одно сферическое неравномерное прецессионное движение. Кроме того, вместо программного движения использовано удобное для исполнения полупрограммное движение, состоящее из неуправляемого неравномерного движения и программного обратного управляемого движения, симметричного с предыдущим движением. Данный метод может быть реализован на предлагаемом робототехническом устройстве, а также на существующих в технике идентификационных устройствах при небольших изменениях в конструкции. Возможно применение метода в задачах идентификации крупногабаритных транспортных изделий – автомашин, спутников – при исполнении ими полупрограммных движений в условиях неизвестных диссипативных моментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Комитета по науке и высшей школе Санкт-Петербурга за 2009 г.

Литература

1. Гернет М.М., Ратобыльский В.Ф. Определение моментов инерции. – М.: Машиностроение, 1969.
2. Previati G., Mastinu G., Gobbi M, Advances on inertia tensor and centre of gravity measurement: The INTENSO+ system // SAWE paper. – 2009. – № 3465.
3. Беляков А.О., Блаженнова-Микулич Л.Ю. Идентификация инерционной матрицы консервативной колебательной системы // Вестн. Моск. ун-та. – 2005. – №3. – С. 25–28.
4. Беляков А.О., Сейранян А.П. Определение моментов инерции крупногабаритных тел по колебаниям в упругом подвесе // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2008. – № 2. – С. 49–62.
5. Bogdanov V.V., Volobuev V.S., Kudryashov A.I., Travin V.V. A Suite for Measuring Mass, Coordinates of the Center of Mass, and Moments of Inertia of Engineering Components // Measurement Techniques. – 2002. – V. 45. – № 2. – P. 168–172.
6. Hahn H., Niebergall M. Development of a measurement robot for identifying all inertia parameters of a rigid body in a single experiment// IEEE Trans. Control Systems Technol. – 2001. – № 9 (2). – P. 416–423.

7. Банит Ю.Р., Беляев М.Ю., Добринская Т.А., Ефимов Н.И., Сазонов В.В., Стажков В.М. Определение тензора инерции Международной космической станции по телеметрической информации // Космические исследования. – 2005. – Т. 43. – № 2. – С. 135–146.
8. Алексеев К.Б., Шадян А.В. Определение динамических параметров космического летательного аппарата по признакам динамической асимметрии // Машиностроение и инженерное образование. – 2007. – № 2. – С. 53–58.
9. Мельников В.Г. Метод идентификации тензоров инерции и центров масс твердых тел // III Всерос. совещание-семинар зав. каф. теоретической механики РФ – Пермь: ПГУ, 2004.
10. Мельников В.Г. Многочленные преобразования нелинейных систем управления // Известия вузов. Приборостроение. – 2007. – Т. 50. – № 5. – С. 20–25.
11. Патент РФ на изобр. №2262678. Мельников В.Г. Способ определения тензора инерции тела. – Опубл. БИ № 29, 20.10. 2005.
12. Мельников В.Г. Использование программных движений для идентификации тензора инерции и центра масс твердого тела // Известия вузов. Приборостроение. – 2007. – Т. 50. – № 8. – С. 33–36.
13. Шаховал С.Н. Исследование матричных алгебраических уравнений, определяющих тензор инерции через осевые моменты инерции // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2008. – № 47. – С. 196–201.

Мельников Виталий Геннадьевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, melnikov@mail.ifmo.ru

УДК 534.1:53.085.1

МОДЕЛЬ ЛАНЧЕСТЕРА И ДИНАМИКА СПИРАЛЬНО-АНИЗОТРОПНЫХ СТЕРЖНЕЙ

П.А. Сергушин

Рассмотрена модель динамической системы с активным демпфером Ланчестера – составлена схема Simulink, исследованы реакции на стандартные входные воздействия. Предложены альтернативы применения. **Ключевые слова:** динамика, колебания, демпфер Ланчестера, спиральная анизотропия.

Введение

Исследования колебаний в механических системах актуальны для многих областей науки и промышленности. Одним из наиболее значимых эффектов является свойство возникновения резонанса при воздействии на систему с некоторыми характерными для нее частотами. На практике явление резонанса может иметь негативные последствия – износ деталей механизмов, ослабление резьбовых соединений, появление шумов при работе механизмов и пр. Для гашения колебаний и сдвига резонансных частот применяют демпфирующие элементы [1].

Демпфер Ланчестера (рис. 1) представляет собой устройство, вращающееся вместе с валом как жесткое тело и рассеивающее энергию крутильных колебаний. Известны работы [2], в которых демпфер Ланчестера применяется для гашения линейных перемещений при механическом возбуждении системы в широком частотном диапазоне,

при этом прогнозируется наиболее эффективное демпфирование по сравнению с настраиваемыми демпферами.

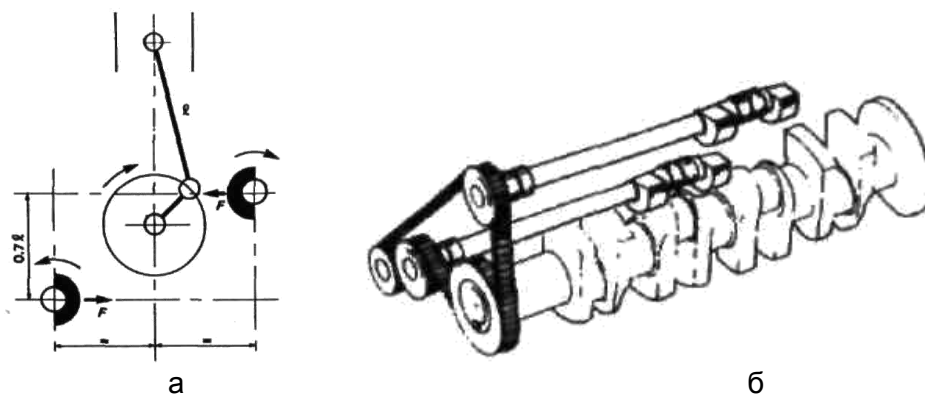


Рис. 1. Демпфер Ланчестера в двигателе внутреннего сгорания: а – кинематическая схема, б – внешний вид конструкции

Математическая модель

Рассмотрим систему с двумя степенями свободы и демпфером Ланчестера (рис. 2). Тело M связано с основанием при помощи демпфера и нелинейной пружины, а тело m прикреплено к M лишь при помощи демпфера. Возбуждение (внешнее воздействие) осуществляется через первое тело.

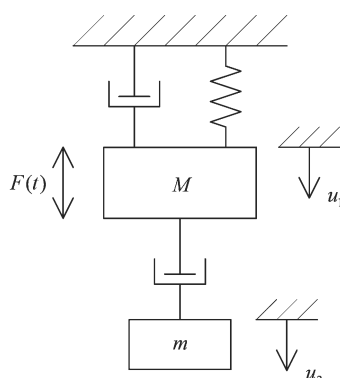


Рис. 2. Пример демпфера Ланчестера

Уравнения движения системы:

$$\begin{cases} \ddot{u}_1 + \hat{\mu}_1 \dot{u}_1 - \hat{\mu}_2 \dot{u}_2 + u_1 + 3\alpha u_1^2 + \alpha u_1^3 = F(t); \\ \ddot{u}_2 + \gamma(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) = 0, \end{cases}$$

где u_i – перемещения; $\hat{\mu}_i$, γ – коэффициенты демпфирования; $i = 1, 2$ – индекс тела; α – коэффициент нелинейности; $F(t)$ – входное воздействие. Для определения динамики системы при различных параметрах по уравнениям движения составлена схема (рис. 3) моделирования в программе Simulink, входящей в ППП Matlab [3].

Моделирование будем осуществлять при различных сочетаниях параметров, отвечающих за демпфирование и нелинейность системы, воздействуя на нее типовыми единичными сигналами – синусоидальным, ступенчатым и импульсным (рис. 4–6 соответственно).

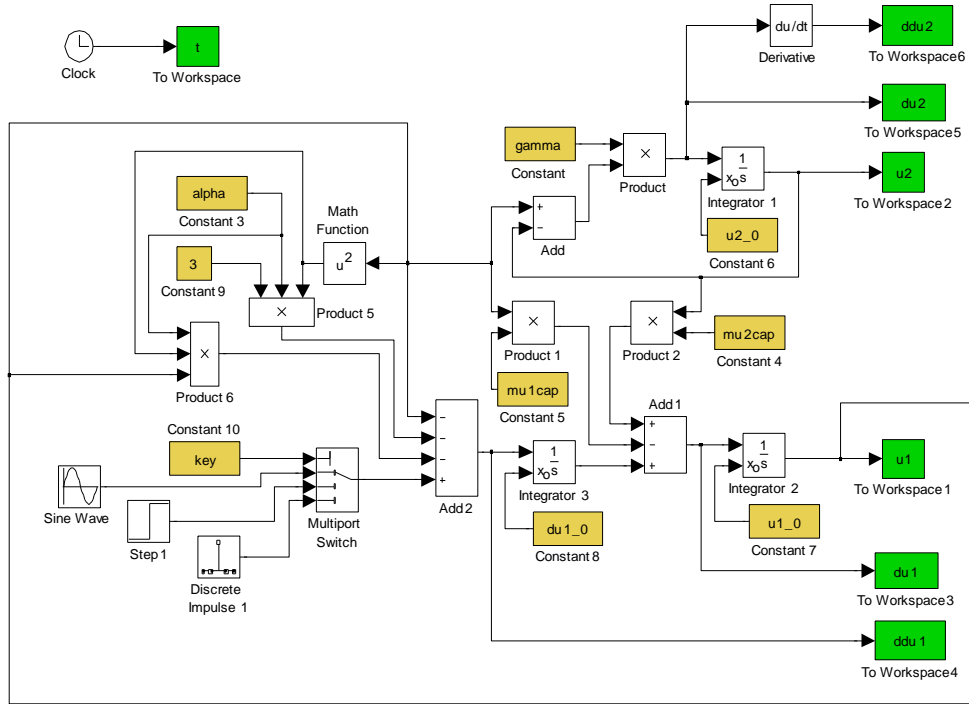


Рис. 3. Схема Simulink для модели демпфера Ланчестера

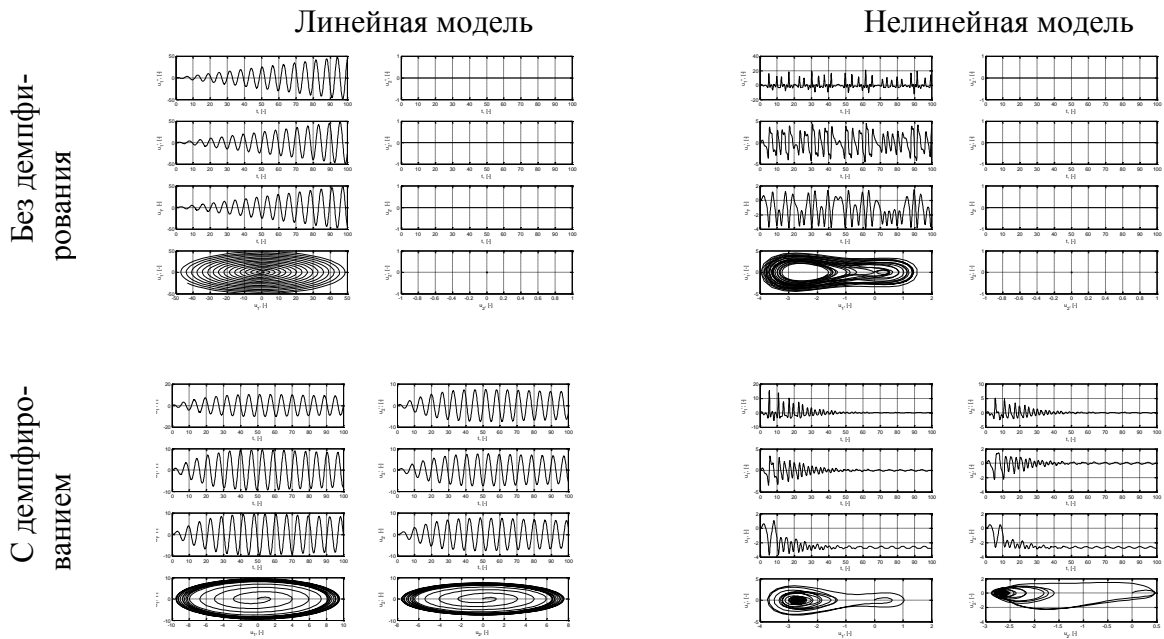


Рис. 4. Реакция на единичное синусоидальное воздействие

Здесь и далее в каждом блоке графиков сверху вниз представлены соответственно ускорение, скорость, перемещение и фазовый портрет (в левой колонке – для первого тела, в правой – для второго). В блоках графиков слева представлены реакции на стандартные воздействия линейной модели, справа – нелинейной. В блоках первой строки демпфирование отсутствовало, во второй – действовало.

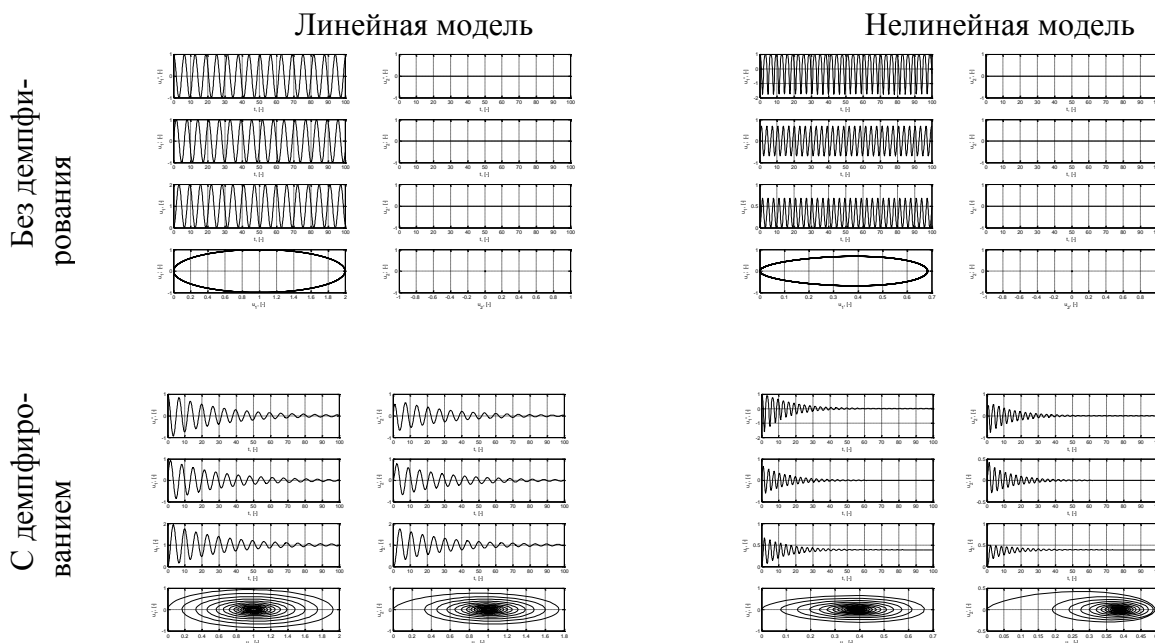


Рис. 5 – Реакция на единичное ступенчатое воздействие

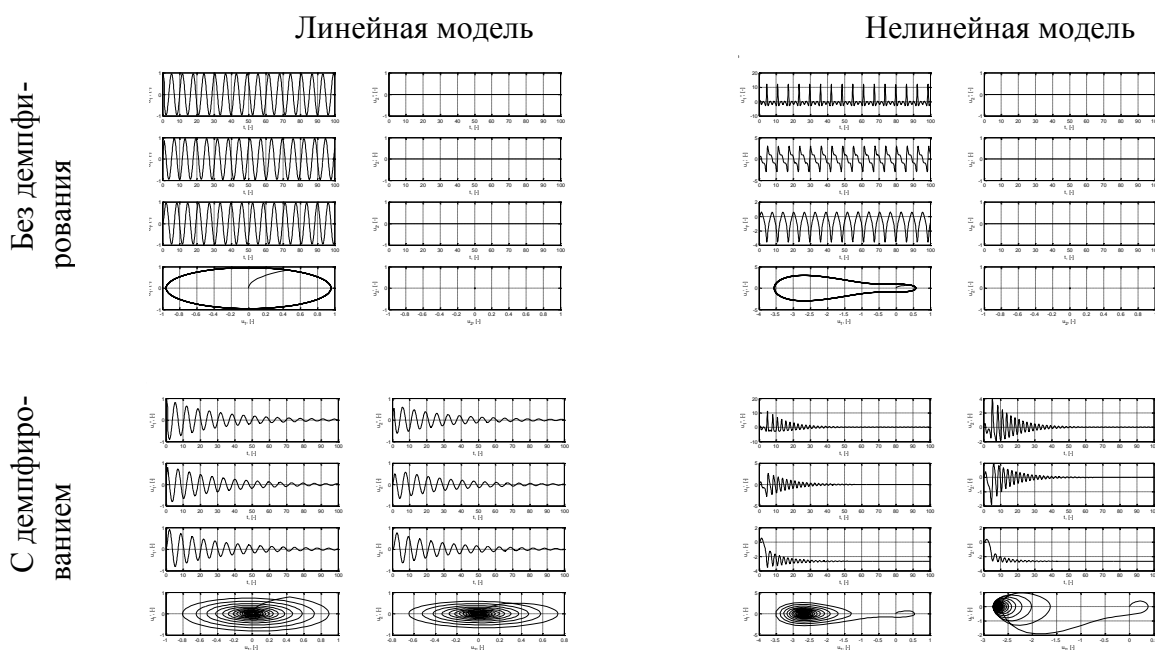


Рис. 6. Реакция на единичное импульсное воздействие

Из рис. 4–6 видно, что в случае как линейной, так и нелинейной модели введение демпфера позволяет изменить параметры колебаний (вид, амплитуду, фазу, затухание), что достигается подбором параметров демпфера. В связи с этим представляется перспективным использование демпфера Ланчестера:

- для демпфирования колебаний чувствительного элемента магнитометра, представляющего собой магнит, совершающий угловые колебания на бифилярном подвесе [4] (рис. 7, а);

– для гашения колебаний скважинных приборов, спуск которых осуществляется на геофизическом кабеле, имеющем спиральную анизотропию, где вследствие ступенчатого характера осевой нагрузки при подъеме и спуске таких приборов, а также наличия инерции и неравномерности свойств подвеса возникают паразитные крутильные и осевые колебания системы (рис. 7, б).

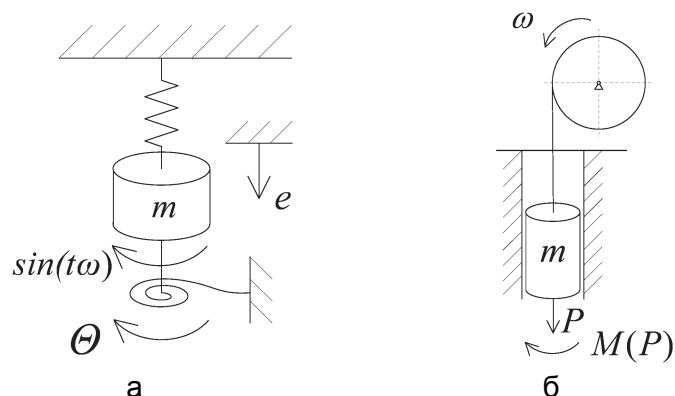


Рис. 7. Перспектива применения демпфера Ланчестера

Заключение

Рассмотрена модель системы с демпфером Ланчестера, составлена схема Simulink, исследованы реакции на стандартные входные воздействия. Предложены альтернативы применения рассматриваемого демпфера.

Литература

1. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний: Учебник для вузов. – М.: Высш. школа, 1980.
2. Асфар К.Р., Найфе А.Х., Барраш К.А. Нелинейный осциллятор с демпфером Ланчестера // Труды американского общества инженеров-механиков. Конструирование и технологии машиностроения, № 3. – М.: Мир, 1988.
3. Дьяконов В.П. MATLAB 6.5 SP1 + Simulink 5 и MATLAB 7 + Simulink 6 в математике и математическом моделировании. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005.
4. Сергушин П.А. Магнитовариометр как средство измерения магнитных полей // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2006. – № 28. – С. 173–176.

Сергушин Павел Анатольевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, pavel.sergushin@gmail.com

УДК 621.3

РАЗРАБОТКА ОСЦИЛЛЯТОРА МАЛЫХ УГЛОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

М.М. Буслаева

Осциллятор – физическая система, совершающая колебания. В статье приводятся результаты проектирования и расчета параметров осциллятора малых угловых колебаний. В процессе проведения исследований рассмотрены типы упругих подвесов для подвижной части системы, в рассматриваемом случае – стального диска, даны рекомендации по их выбору и расчету, а также приведены выбор и основные расчетные соотношения для разработки электроприводного устройства осциллятора. Разработка осциллятора проводилась в рамках НИР по проектированию модуляционного датчика горения – быстродействующего устройства обнаружения пламени.

Ключевые слова: малые угловые перемещения, механический резонанс, упругий подвес, электромагнитный привод.

Введение

В технике используются устройства, в которых присутствуют угловые колебания малой амплитуды (сотые доли радиана и менее). Это, например, высокоточные оптико-механические системы, в частности, системы сканирования изображений с малым углом обзора и оптико-механические модуляторы, астронавигационные системы ориентации по звездам, камертонные генераторы (акустическая техника), высокостабильные электромеханические эталоны частоты и времени, датчики систем инерциальной навигации. При этом частоты колебаний таких осцилляторов могут быть значительными и составлять десятки – сотни герц при углах десятые – сотые доли радиана.

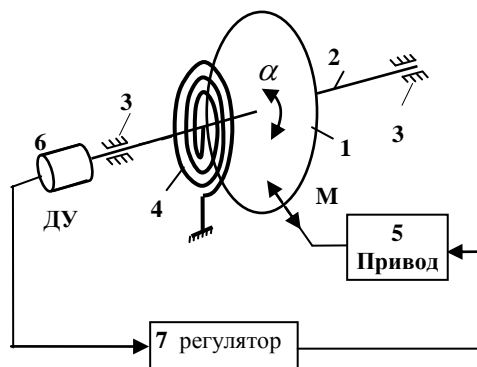


Рис. 1. Структурно-функциональная схема автогенератора с электромеханическим осциллятором

Рассмотрим автогенератор с электромеханическим осциллятором малых угловых колебаний, структурно-функциональная схема которого представлена на рис. 1. Здесь осциллятор состоит из стального диска 1, закрепленного на валу 2, установленном в подшипниках 3 и соединенном с основанием через упругую связь 4. Движение диска 1 сообщает привод 5, который вместе с датчиком угла поворота 6 и усилителем 7 образует замкнутую автоматическую систему управления колебаниями диска 1, обеспечивающую заданную амплитуду его непрерывных колебаний относительно нейтрального положения.

Из теории высокочастотных колебательных систем известно, что наилучших энергетических соотношений, наибольшей долговечности и стабильности работы системы можно достичь на резонансной частоте колебательного звена, в данном случае образованного диском 1 и упругим элементом 4. Дальнейшие расчеты, представленные в статье, опираются на это условие.

Выбор типа закрепления подвижного элемента осциллятора

Для случая малых колебаний целесообразно отказаться от подшипников как таковых, используя упругий подвес подвижного элемента. Это позволит увеличить срок службы механической части системы (рис. 1), точность и стабильность ее работы. При этом конструкция подвеса должна обеспечивать определенную податливость по рабочей степени свободы диска 1 – вращению вокруг оси симметрии – и высокую жесткость по остальным пяти степеням свободы. Такими свойствами в разной степени обладают, в частности, подвесы с применением плоских пружин (рис. 2). Здесь в точке O механическая ось диска жестко скреплена с плоской пружиной, и подразумевается, что с противоположной стороны диска (по отношению к плоскости рисунка) имеется аналогичное упругое закрепление. Следует отметить, что для малых углов поворота диска вокруг своей оси смещение его центра вращения в случаях (а) и (б) будет пренебрежимо малым.

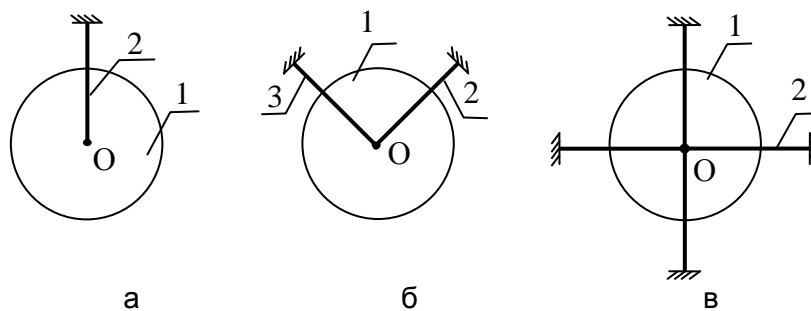


Рис. 2. Схемы упругого закрепления стального диска: а – на плоской пружине, б – упругий подвес уголкового типа, в – упругий подвес с крестообразным креплением

Отметим также, что подвес типа (а) относительно податлив для двух нежелательных степеней свободы, что легко устраняется применением уголкового либо крестообразного подвеса (рис. 2, б, в). При этом крестообразный подвес (рис. 2, в) имеет при прочих равных параметрах большую жесткость, чем подвесы по рис. 2, а, б. Для увеличения жесткости по осевому направлению можно ввести дополнительную растяжку струной вдоль оси вращения диска.

Вообще, струны и торсионы используют для упругого закрепления элементов наряду с плоскими пружинами. Например, в схеме рис. 2, в, плоские пружины 2 вполне могут быть заменены струнами с учетом упомянутой выше дополнительной растяжки вдоль оси вращения. В этом случае требуемая жесткость системы по рабочей степени свободы обеспечивается исключительно силами натяжения струн, что ограничивает точность поддержки данного параметра, а, значит, и точность задания частоты собственных колебаний осциллятора.

Применяя к движению диска с моментом инерции J основное уравнение динамики вращательного движения твердого тела вокруг неподвижной оси, получаем следующее дифференциальное уравнение колебаний, происходящих под действием вращающего момента M , создаваемого приводом:

$$J \cdot \alpha'' + k_d \cdot \alpha' + c \cdot \alpha = M ,$$

где $J = m \cdot R^2 / 2$, m – масса диска, кг, R – радиус диска, м; k_d – коэффициент демпфирования, Нм/с⁻¹; c – коэффициент жесткости пружины, Нм; α – угол, на который поворачивается диск. Применив к данному дифференциальному уравнению преобразование Лапласа, получаем передаточную функцию в виде

$$W(p) = \frac{\alpha(p)}{M(p)} = \frac{1}{J \cdot p^2 + k_d \cdot p + c}$$

или, в соответствии со стандартной формой представления колебательного звена,

$$W(p) = \frac{\alpha(p)}{M(p)} = \frac{\frac{1}{c}}{\frac{J}{c} \cdot p^2 + \frac{k_d}{c} \cdot p + 1} = \frac{\frac{1}{c}}{T^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T \cdot \xi \cdot p + 1},$$

где $T = \sqrt{J/c}$ – постоянная времени переходного процесса; $\xi = k_d/(2Tc)$ – коэффициент затухания колебаний. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) данного звена имеет вид

$$H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(c - J \cdot \omega^2)^2 + k_d^2 \cdot \omega^2}} = \frac{\frac{1}{c}}{\sqrt{(1 - T^2 \cdot \omega^2)^2 + 4 \cdot \xi^2 \cdot T^2 \cdot \omega^2}}.$$

Вид АЧХ при трех различных значениях коэффициента затухания колебаний ξ изображен на рис. 3.

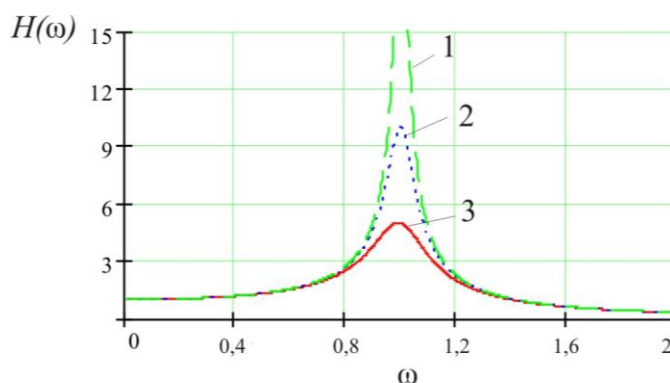


Рис. 3. АЧХ колебательных звеньев: 1 – $\xi = 0,01$; 2 – $\xi = 0,02$; 3 – $\xi = 0,05$

В данном выражении частота ω является заданной, момент инерции J рассчитан исходя из заданных размеров и материала диска, коэффициент демпфирования k_d определяется потерями на трение подвижных частей о воздух. Единственным свободным параметром здесь является жесткость c , которую логично выбирать исходя из максимума АЧХ, т.е. требуется исследовать $H(\omega)$ на экстремум по c .

Поскольку функции $1/x$ и \sqrt{x} – монотонные, то исследуем на экстремум подкоренное выражение в знаменателе функции $H(\omega)$. Приравняв его производную к нулю, получаем искомую жесткость:

$$c = J \cdot \omega^2.$$

Тогда при таком значении c функция $H(\omega)$ примет вид

$$H(\omega) = \frac{1}{k_d \cdot \omega} = \frac{1}{2 \cdot \xi \cdot T \cdot c \cdot \omega} = \frac{1}{2 \cdot \xi \cdot \sqrt{J \cdot c} \cdot \omega} = \frac{1}{2 \cdot \xi \cdot J \cdot \omega^2}.$$

Если учесть, что значение ξ может составлять 0,001, то возможно увеличение энергоэффективности системы в $\frac{1}{2 \cdot 0,001} = 500$ раз. Приблизительно значение функции $H(\omega)$ в

области низких частот будет равно $H(\omega) = \frac{1}{c}$, а в области высоких частот

$H(\omega) = \frac{1}{J \cdot \omega^2}$. Сравнивая три полученных значения функции $H(\omega)$, можно сделать вывод, что найденный экстремум является ее максимумом. Соответственно, для создания колебаний с амплитудой α_m привод должен обеспечить момент

$$M = \alpha_m \cdot 2 \cdot \xi \cdot J \cdot \omega^2, \quad (1)$$

где ω – резонансная частота.

Расчет геометрических параметров упругих подвесов из плоских пружин

При расчетах упругих элементов, состоящих из плоских пружин, следует иметь в виду, что их жесткость, помимо типа сечения, определяется первыми степенями длины и ширины и кубом толщины. Поэтому искомым параметром целесообразно выбирать именно толщину пружины. В численных примерах, исходя из геометрической соразмерности упругих пружин с диском, для параметров пружин приняты следующие значения: длина $l = 30$ мм, ширина $b = 5$ мм.

Расчет плоской пружины на изгиб и выбор геометрических параметров при заданной жесткости для подвеса простейшей конструкции (рис. 2, а). Рассматривая модель плоской пружины в статике в соответствии с [1, стр. 466], имеем:

$$\lambda = \frac{4 \cdot l^3}{b \cdot h^3} \cdot \frac{P}{E}, \quad (2)$$

где λ – прогиб конца плоской пружины, м; l – длина плоской пружины, м; b и h – соответственно ширина и толщина плоской пружины, м; $P=M/l$ – нагрузка на пружину, Н; E – модуль упругости первого рода для материала пружины. Можно показать, что в рассматриваемых пределах изменений углов величина угла α определяется выражением

$$\lambda = \alpha_m \cdot l,$$

где α_m – максимальный угол изгиба (угол поворота диска). Подставляя (1) в (2), можно получить формулу для расчета толщины пружины:

$$h = \sqrt[3]{\frac{8 \cdot \xi \cdot J \cdot \omega^2 \cdot l}{E \cdot b}}. \quad (3)$$

Проведем расчет толщины плоской пружины подвеса для стального диска (радиус $R = 25$ мм, толщина 1 мм). Заданная амплитуда угловых колебаний диска равна 0,03 рад, частота 100 Гц, материал плоских пружин – бронза бериллиевая ($E=13,510 \cdot 10^{10}$ Н/м²).

$$h = \sqrt[3]{\frac{8 \cdot 0,01 \cdot 4,7836 \cdot 10^{-6} \cdot (2 \cdot \pi \cdot 100)^2 \cdot 30 \cdot 10^{-3}}{13,51 \cdot 10^{10} \cdot 5 \cdot 10^{-3}}} \approx 0,19 \text{ мм}.$$

Полученное значение плоской пружины (0,19 мм) является вполне реализуемым с точки зрения возможности изготовления и с точки зрения требований к размерам конструкции. Однако при данном типе закрепления будет иметь место смещение оси в плоскости диска на величину $\lambda = \alpha_m \cdot l = 0,03 \cdot 30 = 0,9$ мм, что в некоторых случаях может оказаться недопустимым.

Расчет параметров упругих элементов уголкового типа (рис. 2, б). Схеме упругого закрепления диска рис. 2, б соответствует кинематическая схема, изображенная на рис. 4. Поскольку плоских пружин две, то для создания амплитуды колебаний диска α_m потребуется вдвое меньший момент, чем в случае крепления на одной пластине,

тогда, задаваясь ее жесткостью $\frac{M}{\alpha_m} = \frac{1}{2} c$ (множитель 1/2 применен, поскольку всего в

конструкции имеется два одинаковых упругих подвеса уголкового типа с двух сторон диска), можно из (3) выразить толщину h как $h = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot l \cdot c}{2 \cdot E \cdot b}}$, и с учетом (1) получим

$$h = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot l \cdot J \cdot \omega^2}{2 \cdot E \cdot b}}.$$

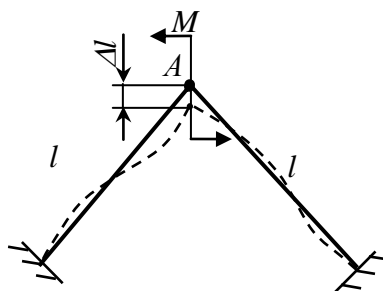


Рис. 4. Кинематическая схема упругого подвеса уголкового типа

При этом для количественной оценки отклонения центра вращения от своего начального положения может быть получено приближенное соотношение:

$$\Delta l = \frac{54 \cdot \alpha^2 \cdot J^2 \cdot \omega^4 \cdot l^5}{140 \cdot E^2 \cdot b^2 \cdot h^6}.$$

В итоге для рассматриваемого примера получим: $h = 0,5$ мм, $\Delta l = 0,000000156$ мм. Действительно, положение центра в этом случае можно считать практически неизменным, а геометрические параметры системы для заданной резонансной частоты 100 Гц – физически реализуемыми.

В случае необходимости существенного увеличения жесткости системы следует выбирать схему с крестообразным креплением (рис. 2, в), которая, помимо увеличения жесткости за счет самой конструкции, позволяет дополнительно увеличивать ее путем предварительного натяжения элементов. Однако в рамках решаемых в данной статье задач схема с упругим подвесом уголкового типа (рис. 2, б) вполне удовлетворяет условиям проектирования, кроме того, по сравнению со схемой рис. 2, в, остается свободным большой по площади сектор для размещения внешних дополнительных элементов, например, полюсов привода.

Разработка приводного устройства осциллятора

Анализ показал, что среди электромеханических приводов диска наиболее эффективной является электромагнитная система с изменяющейся площадью зазора (рис. 5, на котором показана часть диска 1 в виде сектора). Пара электромагнитов 2 и 3 необходима для создания усилий в противоположных направлениях (так как электромагнитный привод может только притягивать якорь, но не отталкивать).

Известно, что электромагнитный момент M связан с энергией магнитного поля W_m через производную по угловому перемещению:

$$M(\alpha) = \frac{dW_m(\alpha)}{d\alpha}. \tag{4}$$

Можно показать, что

$$W_m = (I \cdot w)^2 \cdot G_m,$$

где $I \cdot w$ – магнитодвижущая сила, A – число витков, G_m – магнитная проводимость, Гн.

Считая магнитную цепь ненасыщенной, имеем

$$G_m = \frac{S \cdot \mu \cdot \mu_0}{l}, \tag{5}$$

где S – площадь поперечного сечения участка магнитной цепи, l – длина участка магнитной цепи, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – абсолютная магнитная проницаемость вакуума; μ – относительная магнитная проницаемость среды распространения магнитных линий. В

данном случае для воздуха считаем $\mu_{\text{возд}}=1$, а проводимость магнитопровода считаем абсолютной (так как μ для железа составляет тысячи отн. ед.), т.е. учитываем в расчетах лишь воздушный зазор.

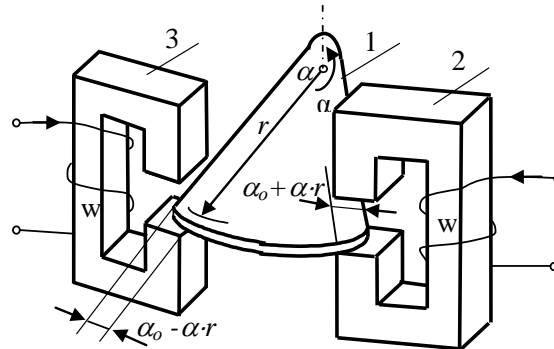


Рис. 5. Привод диска с изменяющейся площадью зазора: 1 – часть стального диска (сектор), 2 – правый привод, 3 – левый привод

Принимая во внимание, что магнитная проводимость зазора является функцией углового перемещения α (см. рис. 4) и в конечном счете имеет вид

$$G_m(\alpha) = \frac{S_0 \cdot \mu \cdot \mu_0}{2} \cdot \left[\left(1 + \frac{2 \cdot \alpha}{\alpha_0} \right) \cdot \frac{1}{(\delta - d)} + \left(1 - \frac{2 \cdot \alpha}{\alpha_0} \right) \cdot \frac{1}{\delta} \right], \quad (6)$$

с учетом (3) – (6) получим:

$$M = I^2 \cdot w^2 \cdot \frac{S_0 \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot d}{\alpha_0 \cdot \delta \cdot (\delta - d)},$$

где S_0 – площадь полюса магнитопровода в зазоре, м^2 ; α_0 – угловой размер полюса магнитопровода в зазоре; δ – величина воздушных зазоров между полюсами статора привода, d – толщина диска. Отсюда, зная требуемый момент вращения $M = M_m$, получим требуемое значение магнитодвижущей силы:

$$I \cdot w = \sqrt{\frac{M_m \cdot \alpha_0 \cdot \delta \cdot (\delta - d)}{S_0 \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot d}}. \quad (7)$$

С другой стороны, считая магнитную систему ненасыщенной, т.е. используя свойства ее линейности, можно определить м.д.с. по заданной допустимой индукции $B_{\text{доп}}$ в магнитном зазоре, исходя из соотношений $\Phi = B_{\text{доп}} \cdot S$ и $\Phi = I \cdot w \cdot G_m$ в виде $I \cdot w = \frac{B_{\text{доп}} \cdot S}{G_m}$.

Тогда, учитывая, что максимальное значение индукции имеет место в части зазора, перекрытой сектором диска, получим:

$$I \cdot w = \frac{B_{\text{доп}} \cdot (\delta - d)}{\mu_0}. \quad (8)$$

Проанализировав выражения (7) и (8), приходим к выводу, что из них целесообразно определять размеры полюса магнитопровода по его площади S_0 , предварительно задавшись размерами δ и d и выбрав α_0 соразмерно с амплитудой колебаний диска α_m . Соответственно,

$$S_0 = \frac{M \cdot \alpha_0 \cdot \delta \cdot \mu_0}{B_{\text{доп}}^2 \cdot d \cdot \mu \cdot (\delta - d)}. \quad (9)$$

После определения всех размеров магнитопровода следует рассчитать размеры обмотки, создающей заданную магнитодвижущую силу $I \cdot w$. Задаваясь плотностью тока $j_{\text{доп}}$,

можно определить площадь меди в обмотке, $Q = \frac{I \cdot w}{j_{\text{доп}}}$, которую подходящим образом

(исходя из конструктивных особенностей) можно разбить на ширину обмотки $b_{\text{обм}}$ и толщину намотки $h_{\text{обм}}$ с учетом коэффициента ее заполнения медью $K_{\text{зап}}$ так, чтобы вы-

полнилось соотношение $b_{\text{обм}} \cdot h_{\text{обм}} = \frac{Q}{K_{\text{зап}}} = \frac{I \cdot w}{j_{\text{доп}} \cdot K_{\text{зап}}}$. Далее, если задано максимальное

напряжение, прилагаемое к обмотке управления U_m , то в принципе можно определить диаметр провода $d_{\text{пр}}$ так, чтобы, будучи уложенным в обмотку сечением $b_{\text{обм}} \times h_{\text{обм}}$ с учетом суммарной его длины, он имел бы сопротивление $R = U_m/I$. При этом индуктивным сопротивлением обмотки можно пренебречь.

Оценим применимость данных принципов расчета привода для рассматриваемого числового примера. Исходя из принципа соразмерности геометрических параметров проектируемого привода и диска и задавшись для численного примера значениями параметров $\delta = 1,4$ мм; $d = 1$ мм; $\alpha_0 = 0,08$ рад; $B_{\text{доп}} = 0,8$ Тл; $j = 5 \cdot 10^6$ А/м, по (8) находим $I \cdot w = 254,777$ ампер-витков. По (9) находим $S_0 = 31,1$ мм², $b_{\text{обм}} \times h_{\text{обм}} = 72,8$ мм² ($K_{\text{зап}} = 0,7$). Например, размеры магнитного полюса $S_0 = 5$ мм \times 6,22 мм = 31,1 мм², а сечение обмотки $Q = 8$ мм \times 9,1 мм. Исходя из полученных значений и задавая максимальное напряжение питания равным, например, $U_m = 5$ В, при токе $I = 0,17$ А (материал провода обмотки – медь, сопротивление обмотки 29,4 Ом), получаем следующие параметры обмотки: $d_{\text{пр}} = 0,25$ мм, $S_{\text{пр}} = 0,0491$ мм², $w = Q/S_{\text{пр}} = 1483$ витка. При этом индуктивное сопротивление обмотки составляет примерно $1,97 \cdot 10^{-10}$ Гн, что подтверждает пренебрежимо малую величину индуктивного сопротивления.

В целом результаты проведенных расчетов показывают принципиальную реализуемость конструкции предложенного привода.

Заключение

Полученные в ходе расчетов значения геометрических размеров упругого подвеса, геометрических размеров полюсов привода, электрических и геометрических параметров обмотки подтверждают реализуемость предложенной конструкции упругого подвеса подвижного элемента осциллятора и привода, а также методики расчета их элементов. Поскольку в статье рассматриваются угловые перемещения существенно малой амплитуды по сравнению с 2π рад, то целесообразно привод выполнить многополюсным. Например, для $\alpha_m = 0,03$ рад, принимая 3-кратный запас для полюсов привода и элементов конструкции на краю диска по его периметру, получим $2\pi/(3 \cdot 0,03) = 70$ пар полюсов. Соответственно, эффективность привода может быть повышена в 70 раз.

Описанный в статье осциллятор был использован при проектировании модуляционного датчика пламени, что позволило увеличить его быстродействие с единиц секунд до сотых долей секунды.

Литература

1. Справочник конструктора точного приборостроения / Г.А. Веркович, Е.Н. Головенкин, В.А. Голубков и др.; Под общ. ред. К.Н. Явленского, Б.П. Тимофеева, Е.Е. Чаадаевой. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 792 с.
2. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. – М.: Машгиз, 1981. – 391 с.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – 9-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1996. – 638 с.

Буслаева Маргарита Михайловна – Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, аспирант, margo_busl@mail.ru

УДК 536+541.1

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ДОСТОВЕРНОСТИ
И СОГЛАСОВАННОСТИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ
И БАЗ ДАННЫХ**

А.А. Слободов, А.А. Сочагин, Е.Б. Качер, Д.В. Кремнев, М.А. Радин

На основании предложенного подхода к ортогональному представлению термодинамических функций веществ разработан метод и построено соответствующее термодинамическое описание температурной зависимости изобарной теплоемкости. Показана его большая эффективность – как с формальных позиций математического и термодинамического описания, так и с точки зрения достоверности получаемых результатов – по сравнению с традиционными подходами. Предложен также метод согласованного описания низко- и высокотемпературных термодинамических данных (теплоемкости, энтальпии и др.). Сочетание подходов позволяет получить наиболее достоверное описание термодинамических свойств веществ. Построена термодинамическая база данных для широкого круга веществ, реализованная в соответствующем программно-информационном комплексе.

Ключевые слова: термодинамические функции, информация, моделирование, расчет, база данных, теплоемкость, ортогональное представление, согласование данных, программный комплекс.

Введение

Современный уровень развития термодинамического метода в физико-химических исследованиях дает принципиальную и во многих случаях реальную возможность чисто расчетного изучения самых разнообразных по своей природе систем, исключив необходимость их экспериментального исследования. Применение при этом современного аппарата методов термодинамического моделирования и расчета позволяет рассчитывать на получение количественно достоверных результатов при изучении даже достаточно сложных по составу, свойствам и поведению систем. Этот подход становится особо ценным, когда эксперимент оказывается малоэффективным, труднореализуемым или невозможным – в случаях высокой компонентности исследуемой системы, экстремальности значений параметров состояния, одновременного протекания ряда сложных взаимосвязанных физико-химических превращений и др.

Однако эффективность применения даже абсолютно строгих термодинамических методов расчета во многом ограничена наличием и качеством соответствующих термодинамических данных, определяющих значения параметров применяемых методов. Иными словами, достоверность (как качественная, так и количественная) результатов, получаемых расчетным путем, может быть достигнута только при наличии достаточно адекватной и полноценной информации. Несмотря на кажущееся обилие информации, данные нередко противоречивы, неполны, отсутствуют. Притом даже выявление этих неадекватностей, причин их возникновения (тем более, их устранение) представляет собой самостоятельную, многослойную и отнюдь не простую проблему.

Критерии качества термодинамической информации

Первое требование, которому должны удовлетворять базы и банки термодинамических данных, – достаточная их полнота по спектру содержащихся веществ. Другое условие – полнота набора заданных термодинамических характеристик вещества базы, необходимых для корректного построения его термодинамического описания. И, нако-

нец, еще одно, ключевое требование – необходимая достоверность собственно термодинамических характеристик веществ базы.

Конкретизация представленных критериев полноты и достоверности термодинамической информации определяется особенностями методологии эксперимента и расчета при ее получении, качество которых, в свою очередь, может быть описано посредством некоторых общих, не зависящих от специфики методов и природы объектов исследования, показателей. В соответствии с логикой получения данных их можно разбить на три группы, характеризующие собственно эксперимент, методологию обработки его результатов и расчетные (от чисто теоретических до чисто эмпирических) методы получения термодинамических свойств веществ. Реализация такого подхода дает основу для формирования требований, которым должна удовлетворять любая система термодинамических данных, критического анализа существующих систем и построения (если необходимо и возможно) такой, которая бы в максимальной степени удовлетворяла поставленным требованиям.

В качестве базисных показателей, определяющих качество эксперимента, можно выделить следующие: чистота исследуемых веществ, их фазовое состояние, соблюдение и контроль условий опыта, методические особенности измерений, возможные источники случайных (инструментальных) и систематических погрешностей.

Корректность последующей обработки экспериментальных данных определяется следующими основными условиями: адекватностью методики описания данных опыта и их обработки реальным его условиям, единством и строгостью используемых методов обработки, наличием и обоснованностью оценок погрешностей результатов, взаимосогласованностью термодинамических характеристик.

Достоверность термодинамических свойств, полученных расчетным путем (самостоятельным или дополняющим экспериментальное изучение), зависит, в первую очередь, от того, насколько обосновано применение того или иного метода расчета, какова корректность самого метода, насколько достоверны значения его параметров (если таковые имеются), какова их погрешность.

Логика научных исследований и их сегодняшний уровень, к сожалению, не позволяют в большинстве случаев дать универсальные и исчерпывающие ответы на многие из поставленных общих вопросов (не говоря уже о более специфических) и однозначно определить значения показателей качества. Чаще лишь скрупулезный экспертный анализ с привлечением массы прямой и косвенной информации позволяют решить (нередко лишь отчасти) ту или иную проблему достоверности термодинамических характеристик вещества.

Структура термодинамической информации

В целях наиболее всестороннего анализа проблемы и поиска эффективных путей ее решения целесообразно сначала очертить круг термодинамических характеристик, необходимых для построения корректного и полного термодинамического описания произвольной физико-химической системы в допустимой области возможных ее состояний. Для этого может быть использована любая термодинамическая функция вещества – например, его энергия Гиббса $G(P, T)$, которая, используя математический аппарат термодинамики, может быть преобразована к виду:

$$\begin{aligned} \tilde{G}^0(P, T) = & \Delta_f G^0(P_0, T_0) - S^0(P_0, T_0)(T - T_0) + \\ & + \sum_{j=1}^k \left[T \int_{T_{j-1}}^{T_j} \frac{C_j^0(P_0, t)}{t} dt - \int_{T_{j-1}}^{T_j} C_j^0(P_0, t) dt + \left(\frac{T}{T_j} - 1 \right) \Delta H_j^0(P_0, T_j) \right] + \int_{P_0}^P V^0(p, T) dp, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\Delta_f G^0(P_0, T_0) \equiv \Delta_f G_{298}^0$, $S_0(P_0, T_0) \equiv S_{298}^0$ – соответственно энергия Гиббса образования и энтропия вещества при стандартных ($P_0 = 1$ бар, $T_0 = 298,15$ К) условиях; $T_j \equiv T_{tr}$, $\Delta H_j^0(P_0, T_j) \equiv \Delta H_{tr}^0$ – соответственно температуры и стандартные тепловые эффекты фазовых (полиморфных, агрегатных и др.) переходов вещества (если таковые имеются); $C_j^0(P_0, t) \equiv C_{p_j}^0(t) = \partial H^0 / \partial t$ – температурные зависимости стандартных изобарных теплоемкостей для каждой из k фаз вещества, образующихся на интервалах $[T_{j-1}, T_j]$ ($j \in 1:k$; $T_0 = T_0$, $T_k = T$); $V^0(p, T)$ – барическая зависимость стандартного мольного объема на интервале $[P_0, P]$ при температуре T .

Анализ даже наиболее авторитетных систем термодинамической информации [1–5 и др.] вынуждает констатировать невыполнение многих из вышеописанных требований и необходимых характеристик термодинамического описания (1). Описанные проблемы диктуют необходимость проведения экспертизы и согласования имеющихся термодинамических данных с целью обеспечения требований, предъявляемых к создаваемым базам данных. Кроме того, в силу нехватки и противоречивости термодинамической информации остро встает также вопрос о возможностях использования и разработки методов расчета и оценки недостающих данных.

В связи с этим ниже предлагаются два подхода к описанию термодинамических данных (функций) и согласованию результатов, полученных при различных условиях (например, низко- и высокотемпературных), которые открывают новые возможности в решении стоящих проблем качества информации.

Ортогональное представление термодинамических функций

Нехватка и ограниченность возможностей экспериментальных исследований термодинамических свойств многих веществ вынуждает исследователей разрабатывать и пользоваться различными приближенными, чаще эмпирическими, методами расчета и оценки. Эта задача особенно актуальна в области повышенных значений давлений и, главное, температур, где информация нередко труднодоступна и, как следствие, противоречива, ненадежна или вовсе отсутствует.

Полное термодинамическое описание любого вещества или системы (многокомпонентной) включает, в соответствии со структурой выражения (1), две группы данных – точечные значения (типа термических констант $\Delta_f H_{298}^0$, $\Delta_f G_{298}^0$, S_{298}^0 , $\Delta_{tr}^{(i)} H^0$ и др.) и функциональные зависимости (по температуре, давлению, концентрации и др.) – изобарные теплоемкости $C_p^0(T)$, изменения энтальпии $H_T - H_T^0$ и др. Определение последних – несравненно более сложная задача.

Особо следует остановиться на проблеме приближенного расчета теплоемкости $C_p(T)$ веществ, ее температурной зависимости. В отличие, например, от стандартных энтропии и энтальпии здесь стоит задача оценки функциональных зависимостей (от температуры), а не отдельных значений, получаемых для стандартных условий (в частности, при фиксированной температуре 298,15 К). Характер температурных зависимостей теплоемкостей очень сильно зависит от природы вещества и далеко не всегда может быть с достаточной точностью описан известным трехпараметрическим уравнением Майера–Келли [6]

$$C_p(T) = a + bT + c/T^2 \quad (2)$$

или ему подобными. Поэтому нередко используются те или иные полиномиальные варианты его многопараметрического «обобщения», по сути чисто эмпирического. Однако платой за усложнение формы уравнения и повышение точности описания является, как правило, снижение его универсальности и экстраполяционных характеристик. На

эти факты неоднократно обращали внимание исследователи [7, 8 и др.], но не более того, и актуальность этой проблемы, к сожалению, высока и сегодня.

Причина отмеченных недостатков лежит в факте взаимозависимости (даже для простейшего случая (2)) коэффициентов используемого температурного ряда. Поэтому, добавление (как, впрочем, и исключение) даже одного, например, квадратичного, члена в уравнение Майера – Келли,

$$C_p(T) = a + bT + cT^2 + dT^3 \dots, \quad (3)$$

влечет за собой не просто его корректировку за счет появления нового (dT^3) члена в (3), но и пересчет вообще *всех* коэффициентов a, b, c , полученных для исходного уравнения (2). Таким образом, значения всех коэффициентов варьируются в зависимости от выбора формы уравнения, и ни один из них не имеет какого-либо физического смысла.

Отсюда следует, что анализ, сопоставление и выявление закономерностей температурных зависимостей теплоемкостей имеет (причем достаточно ограниченно) практический смысл только в случае однотипного представления этих зависимостей – когда структура их одинакова. Физического смысла параметры этих уравнений не имеют вовсе. Имеющаяся же к настоящему времени достаточно обширная, но с различной степенью точности термодимическая информация [3, 7, 8 и др.] описывается различными уравнениями как по типу, так и по количеству температурных слагаемых. Поэтому сопоставление, анализ этих данных и прогнозирование на его основе неизученных теплоемкостей ряда соединений, как правило, бесперспективны.

Думается, что выходом из создавшегося положения может служить представление теплоемкости (и далеко не только теплоемкости!) через систему так называемых ортогональных (на некотором температурном интервале) функций [9, 10], обладающих тем замечательным свойством, что значения коэффициентов такого представления $C_p(T)$ не зависят от количества используемых функций – при добавлении нового слагаемого «старые» коэффициенты не изменяются. Корректное и эффективное применение данного подхода – например, для изобарной теплоемкости $C_p(T)$ – требует единого (по крайней мере, для определенного класса веществ) задания температурных интервалов, на которых определяется $C_p(T)$ веществ (и на которых это представление должно быть ортогональным).

Целесообразным и с чисто расчетных позиций, и с точки зрения физического смысла представляется задание интервала между двумя физически обоснованными, «реперными» температурами. Это, в зависимости от области, для которой определяется уравнение теплоемкости, либо интервал 298,15 К – точка фазового перехода (плавления T_m или полиморфного превращения T_{tr}), либо интервал между двумя соседними точками фазового (полиморфного или агрегатного) перехода. Отметим, что на этой основе целесообразна не только обработка исходных экспериментальных данных, но также может быть осуществлен «ортогональный пересчет» (т.е. построена искомая система функций), опираясь на уже имеющиеся зависимости – типа Майера–Келли, например. В основе расчета и «пересчета» лежит так называемая процедура ортогонализации [9, 10].

Полученное в результате пересчета известных, ранее полученных зависимостей представление будет иметь то же число слагаемых, что и исходное, однако коэффициенты полученных «новых» представлений не будут зависеть от сложности исходной формы уравнения. При этом полученные коэффициенты будут иметь строго определенный физический смысл (средние на интервале значения теплоемкости, ее температурного коэффициента и др.). И тогда сопоставление (с целью, например, выявления каких-либо закономерностей) соответствующих коэффициентов для соединений определенного класса будет физически корректным и, как оказалось, очень конструктивным, существенно повышая возможности экспертизы, согласования, сравнительного анализа, оценивания данных.

Согласованное описание низко- и высокотемпературных данных

Другой достаточно общей задачей построения зависимостей – например, опять для $C_p(T)$ – является проблема согласования низко- и высокотемпературных данных. Типична ситуация, когда имеются в целом достаточно надежные данные по теплоемкости $C_p(T)$ в высокотемпературной области $[T_1, T_2]$ и значение C_p^0 при фиксированной температуре T_0 (обычно это 298,15 К), но наблюдается рассогласование этих данных, т.е. $C_p(T_0) \neq C_p^0$.

Задачу тогда целесообразно сформулировать так. Необходимо построить новую функцию $\tilde{C}_p(T)$, проходящую через точку C_p^0 и минимально отклоняющуюся от исходной зависимости $C_p(T)$. При этом в качестве критерия отклонения целесообразно рассматривать изменение энтальпии (которая обычно и измеряется!) на интервале $[T_1, T_2]$. Тогда при использовании квадратичного критерия проблема сводится к решению задачи условной минимизации:

$$\int_{T_1}^{T_2} [\tilde{C}_p(T) - C_p(T)]^2 dT \rightarrow \min, \quad \tilde{C}_p(T_0) = C_p^0. \quad (4)$$

Использование указанных выше параметрических представлений изобарных теплоемкостей (как ортогональных, так и неортогональных) позволяет строго сформулировать и решить данную задачу. При этом, как можно видеть, использование ортогональных на промежутке $[T_1, T_2]$ представлений существенно упрощает задачу и позволяет получить наиболее корректные температурные зависимости теплоемкости, учитывающие требуемое согласование низко- и высокотемпературных данных.

Представленная методология была применена для широкого круга соединений. Анализ результатов показал высокую ее эффективность: ортогональные представления оказались несравненно более устойчивыми, чем обычные «вариации на тему» полиномиальных уравнений типа (2), (3), в плане как описания и экстраполяции данных, так и корреляционных зависимостей внутри классов тех или иных веществ. А совместное рассмотрение низко- и высокотемпературных данных по теплоемкости позволило для ряда веществ построить (особенно на основе ортогональных представлений) согласованное, в соответствии с критерием (4), их описание, точность и экстраполяционные возможности которого существенно выше, чем при общепринятых [3, 4, 7, 8 и др.] подходах.

Полученные на основе представленных методов результаты по расчету, оценке, построению температурных зависимостей $C_p(T)$ (для ряда солей, оксидов и др.) показали весьма высокую эффективность предлагаемых методов. В качестве иллюстрации эффективности разработанных методов в таблице представлены результаты расчета коэффициентов A, B, C ортогонального представления $C_p(T)$ для оксидов CaO , P_2O_5 и фосфатов кальция на их основе – $\text{Ca}(\text{PO}_3)_2$, $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$:

$$C_p(T) = A + Bu_2(x) + Cu_3(x), \quad (5)$$

где $u_1(x) \equiv 1$, $u_2(x)$, $u_3(x)$ – ортогональные функции разложения, получаемые процедурой ортогонализации исходных уравнений типа (2), x – нормированная температурная переменная (с предварительным указанием температурного интервала). Для метафосфата $\text{Ca}(\text{PO}_3)_2$ был, кроме того, реализован указанный метод согласованного описания низко- и высокотемпературных данных, что позволило (как подтвердил последующий анализ) построить в итоге наиболее обоснованную температурную зависимость $C_p(T)$.

Данные таблицы не только дают указанные важные физические характеристики соединения (средние на соответствующем температурном интервале значения теплоемкости, ее температурного коэффициента и др.). Как нетрудно видеть, для каждого из соединений ортогональное представление практически удовлетворяют линейно-аддитивному условию расчета коэффициентов A, B, C (т.е. и $C_p(T)$) фосфатов по исход-

ным оксидам (аддитивный расчет дает отклонения, практически линейные по составу – отклонения от линейности существенно ниже погрешности эксперимента). Последний факт позволил построить экстраполяционные ортогональные описания $C_p(T)$ для ряда экспериментально неизученных фосфатов кальция – $\text{CaP}_4\text{O}_{11}$, $\text{Ca}_3\text{P}_4\text{O}_{13}$, $\text{Ca}_4\text{P}_2\text{O}_9$, $\text{Ca}_7\text{P}_{10}\text{O}_{32}$ – и убедиться в эффективности такого подхода.

| | CaO | P ₂ O ₅ | Ca(PO ₃) ₂ | Ca ₂ P ₂ O ₇ | Ca ₃ (PO ₄) ₂ |
|---|--------|-------------------------------|-----------------------------------|---|---|
| A | 54,705 | 123,084 | 221,039 | 259,383 | 268,491 |
| B | 0,444 | 5,758 | -6,775 | 0,722 | 24,677 |
| C | 1,141 | 1,220 | 6,487 | 5,987 | 1,492 |

Таблица. Коэффициенты ортогонального представления $C_p(T)$ некоторых фосфатов кальция и составляющих их оксидов

На основе представленных выше принципов и методов эта работа была выполнена, в результате были созданы согласованные системы стандартных термодинамических свойств веществ, которые реализованы в компьютерных базах, объединенных в банк данных ASTIB. Для него, в свою очередь, разработано необходимое (для определения и расчета как функций параметров состояния термодинамических характеристик веществ) программное «сопровождение». Программный комплекс ASCAT (реализующий разработанные методы моделирования и расчета) и банк данных ASTIB составляют ядро программно-информационного комплекса ASTICS, обеспечивающего эффективное, количественно обоснованное решение рассматриваемых задач моделирования и расчета фазово-химических превращений и состава.

Для ряда природных и химико-технологических систем и процессов полученные результаты по фазово-химическому составу и превращениям в системе, влиянию на них параметров состояния (состава, температуры, давления и др.) строго взаимосвязаны с технологическими и эксплуатационными характеристиками, что позволяет предсказывать поведение и свойства исследуемой системы (материала) и процесса в самых различных условиях с целью их последующей оптимизации.

Заключение

Представлены обоснованные критерии качества термодинамической информации и построено полное термодинамическое описание вещества в произвольной области параметров состояния. Предложен аппарат ортогонального описания термодинамических функций (на примере температурной зависимости теплоемкости). Представлен метод согласованного описания низко- и высокотемпературных термодинамических данных.

Показана эффективность предлагаемых методов и соответствующего программно-информационного комплекса при исследовании фазовых и химических превращений в многокомпонентных системах различной природы.

Литература

1. Smith R.M. Critical stability constants / R.M. Smith, A.E. Martell. – N.Y.: Plenum Press, 1976. – V. 4. – 256 p.
2. Wagman D.D. The NBS table of chemical thermodynamic properties. Selected values for inorganic and C1 and C2 organic substances in SI units / D.D. Wagman, W.H. Evans, V.B. Parker, V.B. Schumm, I. Halow, S.M. Bailey, K.L. Churney, R.L. Nuttall // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 1982. – V. 11. – Suppl. 2. – 394 p.

3. Chase M.W. (Ed.) NIST-JANAF Thermochemical Tables: Part I, II. – 4th Ed. / Ed. M.W. Chase, Jr. / J. Phys. Chem. Ref. Data: Monograph № 9. – N.Y.: NSRDS–AChS–AIPh, 1998. – 1151 p.
4. Глушко В.П. (Ред.) Термические константы веществ: Справочник в 10-ти вып. / В.П. Глушко (Ред.) – М.: АН СССР, 1965–1981.
5. Mohr P.J. CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2006 / P.J. Mohr, B.N. Taylor, D.B. Newell. – Gaithersburg: NIST, 2007. – 105 p.
6. Maier C.G., Kelley K.K. An equation for the representation of high-temperature heat content data // J. Amer. Chem. Soc. – 1932. – V. 52. – № 8. – P. 3243–3246.
7. Гурвич Л.В., Вейц И.В., Медведев В.А. и др. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочное издание в 4-х тт. – М.: Наука, 1978–1982.
8. Robie R.A., Hemingway B.S. Thermodynamic properties of minerals and related substances at 298.15 K and 1 bar (10^5 Pascals) pressure and at higher temperatures // U.S. Geol. Surv. Bull. № 2131. – Washington: Dept. Interior, 1995. – 492 p.
9. Суэтин П.К. Классические ортогональные полиномы. – М.: Наука, 1976. – 327 с.
10. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. – М.: Наука, 1989. – 486 с.

| | | |
|--------------------------------------|---|---|
| <i>Слободов Александр Арсеньевич</i> | – | Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор химических наук, профессор, aslob@ton.net.ru |
| <i>Сочагин Александр Андреевич</i> | – | Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), аспирант, striker112@list.ru |
| <i>Качер Екатерина Борисовна</i> | – | Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, kacherkaterina@list.ru |
| <i>Кремнев Дмитрий Валерьевич</i> | – | Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), аспирант, spbscout@narod.ru |

УДК 536.2

ЭНЕРГОАУДИТ КОТТЕДЖЕЙ И ДРУГИХ ОБЪЕКТОВ МАЛОЭТАЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА МЕТОДОМ ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ И КОНТАКТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ

А.Р. Кямря, Н.В. Серебрянникова, А.А. Залеская

Рассматриваются современные методы исследования строительных конструкций на предмет соответствия их теплофизических свойств нормативным значениям. Предлагается методика оценки теплозащитных свойств ограждающих конструкций малоэтажных зданий на основе тепловизионного обследования как экспресс-метода для выявления скрытых дефектов теплоизоляции. Для более точного и детального анализа качества строительства тепловизионная съемка дополняется контактными измерениями теплофизических параметров и вычислением количественных характеристик ограждающих конструкций. Это составляет основу комплексного обследования объекта.

Ключевые слова: ограждающие конструкции (ОК), энергозатраты, энергосбережение, тепловизионное обследование, термограмма, тепловая защита, теплотехнические показатели.

Введение

Основным требованием, предъявляемым к жилым помещениям для обеспечения комфортного проживания человека без вреда для его здоровья, было и остается обеспечение оптимальных параметров микроклимата. Важнейшую роль в соблюдении данного требования выполняют наружные ограждающие конструкции (ОК) строения, которые призваны обеспечить требуемую теплозащиту. При этом одним из условий достиже-

ния теплового комфорта является обеспечение допустимой разности температур внутреннего воздуха и внутренней поверхности наружных ОК (за исключением светопрозрачных заполнений). В то же время обеспечение требуемого теплового режима с точки зрения комфорта должно сочетаться с минимизацией энергозатрат на его достижение. В связи с этим основными путями экономии энергии для обеспечения нормативных условий теплового комфорта при строительстве жилых зданий являются повышение теплозащитных свойств наружных ОК и применение архитектурно-планировочных (композиционных) решений, минимизирующих площадь наружных ограждений. Вследствие полного отсутствия какого-либо контроля компетентных органов за загородным строительством вопрос энергосбережения особенно остро встает перед собственником уже в период полноценной эксплуатации объекта недвижимости. Здесь наиболее эффективным решением вопроса представляется проведение обследования тепловизионным методом, позволяющим дистанционным способом с минимальными отклонениями локализовать недостатки в тепловой защите и принять меры по их устранению.

Тепловизионное обследование ограждающих конструкций объектов малоэтажной застройки

Алгоритм проведения обследования представляется следующим:

- тепловизионная съемка наружных ОК и анализ термограмм с выявлением участков с температурными аномалиями;
- тепловизионная съемка внутренних поверхностей участков с температурными аномалиями, анализ термограмм с целью выявления предполагаемых дефектных участков;
- определение температур внутренних поверхностей предполагаемых дефектных участков при расчетных условиях эксплуатации и сравнение с нормативными, выявление участков с отклонениями температур, превышающими погрешность измерения;
- выявление причин наличия дефектов и разработка методов по их устранению.

На рис. 1 приведены термограммы фасадов жилого дома, по которым проводится первичная оценка состояния ОК и выявляются наиболее грубые дефекты.

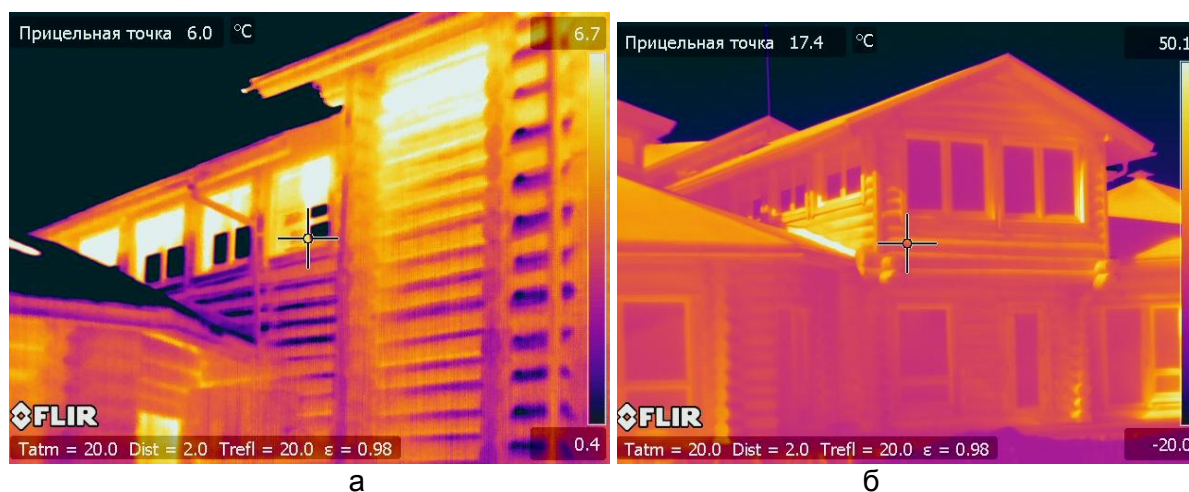


Рис. 1. Термограммы фасадов жилого дома

На рис.1, а, отчетливо видны мостики холода между бревнами фасада, однако это не означает, что температура внутренней поверхности данной стены не будет соответствовать строительным нормам. На рис. 1, б, наиболее холодными поверхностями являются светопрозрачные конструкции. Оценка их теплофизических свойств принято проводить с помощью контактных методов исследования.

Температуру внутренней поверхности ОК $t_{п.в.}^{расч}$ для расчетных условий рекомендуется вычислять по результатам измерений в условиях, отличающихся от расчетных, по выражению [1]:

$$t_{п.в.}^{расч} = t_B - (t_B - t'_{п.в.}) \frac{\alpha_B}{\alpha'_B}, \quad (1)$$

где t_B – расчетная температура внутреннего воздуха; °С; $t'_{п.в.}$ – температура внутренней поверхности ОК при расчетном перепаде температур ($t_B - t_H$) без учета изменения коэффициента теплоотдачи α_B , определяемая по зависимости

$$t'_{п.в.} = t_B - (t_B^{эксп} - t_{п.в.}^{эксп}) \frac{t_B - t_H}{t_B^{эксп} - t_H^{эксп}}; \quad (2)$$

$\alpha_B = \alpha_K + \alpha_{л}$ – коэффициент теплоотдачи от воздуха внутри помещения к внутренней поверхности ОК в эксперименте, Вт/(м²·К); $\alpha'_B = \alpha'_K + \alpha'_{л}$ – то же при t'_B и t_B , Вт/(м²·К); α_K, α'_K – коэффициенты конвективного теплообмена внутренней поверхности ОК с воздухом внутри помещения при $\Delta t = t_B^{эксп} - t_{п.в.}^{эксп}$ и $\Delta t_B = t_B - t'_{п.в.}$ соответственно, Вт/(м²·К), определяемые по эмпирическому графику, представленному в [1]; $\alpha_{л}, \alpha'_{л}$ – коэффициенты лучистого теплообмена внутренней поверхности ОК с воздухом внутри помещения при $t_{cp} = \frac{t_B^{эксп} + t_{п.в.}^{эксп}}{2}$ и $t_{cp} = \frac{t_B + t'_{п.в.}}{2}$ соответственно, Вт/(м²·К), также определяемые по эмпирическому графику в [1]; $t_B^{эксп}$ – средняя за период наблюдений температура внутреннего воздуха, °С; $t_{п.в.}^{эксп}$ – то же внутренней поверхности ОК в рассматриваемой точке, °С; t_H – расчетная температура наружного воздуха, °С; $t_H^{эксп}$ – средняя за период наблюдений температура наружного воздуха, °С.

Однако следует отметить, что в соответствии с графиками для определения $\alpha_{л}, \alpha'_{л}$ и α_K, α'_K эти величины изменяются в довольно узком диапазоне ($0,4 \leq \alpha_K \leq 4,4$; $3,0 \leq \alpha_{л} \leq 4,8$), и отношение $\frac{\alpha_B}{\alpha'_B}$ в формуле (1) вносит незначительный вклад в $t_{п.в.}^{расч}$,

что находится в пределах погрешности метода ее определения. В связи с этим представляется, что с достаточной для инженерных расчетов точностью при определении $t_{п.в.}^{расч}$ может быть использована зависимость

$$t_{п.в.}^{расч} = t_B - (t_B - t'_{п.в.}), \quad (3)$$

За нормативные значения температуры внутренней поверхности принимаются значения, указанные в [2]. По отклонению температуры внутренней поверхности ОК в расчетных условиях от нормативного значения можно определить качество теплозащиты.

На рис. 2 приведен пример выявленного в ходе тепловизионного обследования скрытого дефекта углового стыка стен в жилом помещении загородного дома. Выделенная темная область стыка имеет среднюю температуру поверхности в условиях измерения 15,7 °С. При пересчете по формулам (1), (2) и сравнении с требуемым по [2] значением температуры внутренней поверхности в зонах теплопроводных включений отклонение от нормативного значения с учетом погрешности составило 7,9 °С, что свидетельствует о некачественной заделке стыка.

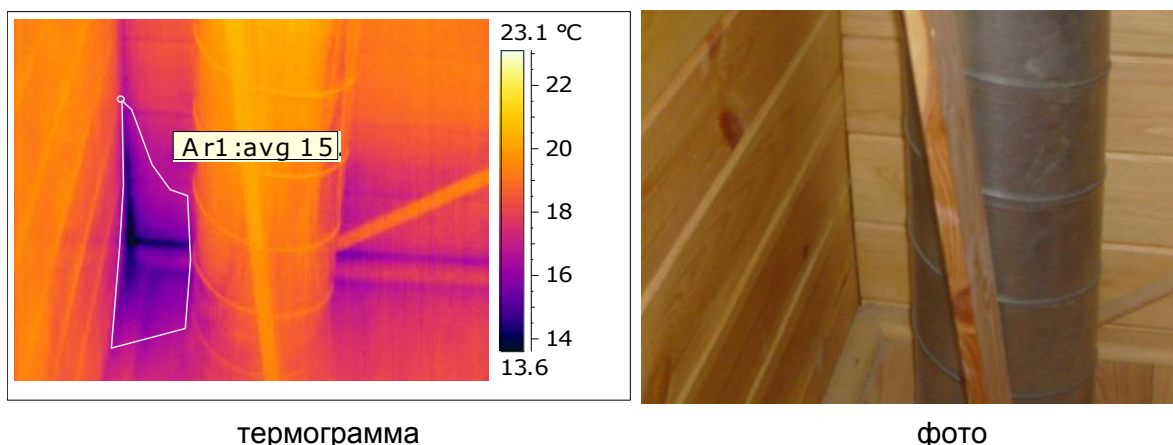


Рис. 2. Выявленный скрытый дефект углового стыка стен

Контактный метод исследования качества ограждающих конструкций

В большинстве случаев для составления теплового баланса здания и определения требуемой мощности системы отопления требуются более качественный анализ тепло-технических свойств ОК, а также экспериментальная оценка тепловых потерь через конструкции жилого дома в натуральных условиях. Для этого в течение нескольких суток проводятся замеры температур внутреннего и наружного воздуха, внутренней и наружной поверхности, а также плотности теплового потока через ОК контактным методом.

При обработке результатов натуральных испытаний строят графики изменения во времени температуры и плотности тепловых потоков, по которым выбирают периоды с наиболее установившимся режимом (с отклонением среднесуточной температуры наружного воздуха от среднего значения за этот период в пределах $\pm 2,5^\circ\text{C}$) и вычисляют средние значения термического сопротивления для каждого периода.

Значение термического сопротивления R_{ki} , $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$, базового (термически однородного) участка ОК вычисляют по формуле [3]

$$R_{ki} = \frac{t_{п.вi} - t_{п.нi}}{q_{\phi i}}, \quad (4)$$

где $t_{п.вi}$ и $t_{п.нi}$ – средние за расчетный период измерений значения температур внутренней и наружной поверхностей ОК соответственно, $^\circ\text{C}$; R_{ki} – термическое сопротивление базового участка i -го ограждения, $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$; $q_{\phi i}$ – средняя за расчетный период измерения фактическая плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$, определяемая [3] по формуле

$$q_{\phi i} = \frac{q(t_{п.в} - t_{п.н})}{(t_{пп} - t_{п.н}) - q(R_T - R_c)} = \frac{q(t_{в} - t_{н})}{(t_{в} - t_{н}) - q(R_T - R_c)}. \quad (5)$$

Здесь q – средняя за расчетный период измеренная плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $t_{в}$ и $t_{н}$ – средние за расчетный период измерений значения температуры внутреннего и наружного воздуха, $^\circ\text{C}$; $t_{пп}$ – температура поверхности преобразователя теплового потока, обращенной внутрь помещения, измеренная при испытаниях, $^\circ\text{C}$; R_T – термическое сопротивление преобразователя теплового потока, определяемое по его паспортным данным, $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$; R_c – термическое сопротивление слоя подложки, прикрепляющего преобразователь теплового потока к поверхности, определяемое расчетом, $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$; $R_{в}$ – сопротивление теплопередаче внутренней поверхности ОК, определяемое расчетным путем по средним значениям $t_{в}$, $t_{п.в}$ и $q_{\phi i}$:

$$R_{в} = \frac{\Delta t}{q_{\phi i}}, \quad (6)$$

$\Delta t = (t_B - t_{п.в.})$, t_B и $t_{п.в.}$ – температуры, соответственно, воздуха в помещении и внутренней поверхности стены, °С.

Значение сопротивления теплопередаче R_0 , м²·К/Вт, базового участка ОК вычисляются по формуле

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_B} + R_k + \frac{1}{\alpha_H}, \quad (7)$$

где α_B – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ОК, определяемый по формуле $\alpha_B = 1/R_B$, Вт/(м²·К); α_H – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К), наружной поверхности ОК, принимаемый по [2].

При невозможности установки датчиков температуры на наружной поверхности ОК допускается определение значения сопротивления теплопередаче R_0 базового участка ОК по формуле

$$R_0 = \frac{t_B - t_H}{q}. \quad (8)$$

При этом по графикам изменения во времени температуры внутреннего t_B и наружного t_H воздуха, а также плотности теплового потока q , как изложено ранее, выбирают периоды с наиболее установившимся режимом, т.е. с отклонением среднесуточной температуры наружного воздуха от среднего значения за этот период в пределах $\pm 2,5$ °С, и вычисляют средние значения сопротивления теплопередаче R_0 для каждого периода. При определении среднего значения сопротивления теплопередаче базового участка учитывается погрешность измерения и расчета, которая анализируется в два этапа:

- вычисление погрешностей прямых измерений, в данном случае это измерение плотности теплового потока, температур внутреннего и наружного воздуха и поверхностей;
- определение погрешности косвенных измерений, т.е. погрешности величин термического сопротивления или/и сопротивления теплопередаче ОК, вычисленных по формулам (4), (8).

Анализ погрешности прямых измерений производится согласно [4]. Окончательный результат прямых измерений имеет вид

$$\bar{t}_B = t_B \pm \Delta t_B, \quad \bar{t}_H = t_H \pm \Delta t_H, \quad \bar{q} = q \pm \Delta q, \quad (9)$$

где \bar{t}_B , \bar{t}_H , \bar{q} – средние арифметические значения из n измерений для температур внутреннего t_B и наружного воздуха t_H , а также плотности теплового потока q ; Δt_B , Δt_H , Δq – границы доверительного интервала (абсолютная погрешность результата измерений) t_B , t_H , q .

Оценивается относительная погрешность результатов серии прямых измерений:

$$\varepsilon = \frac{\Delta t_B}{t_B} 100\%, \quad \varepsilon = \frac{\Delta t_H}{t_H} 100\%, \quad \varepsilon = \frac{\Delta q}{q} 100\%. \quad (10)$$

При анализе погрешности расчета величины сопротивления теплопередаче R_0 для каждой серии измерений величин, входящих в определение искомой величины (а именно, для t_B , t_H и q), проводится такая же обработка, как и при анализе погрешности прямых измерений. При этом для всех измеряемых величин задают одно и то же значение доверительной вероятности α .

Оцениваются границы доверительного интервала для результата косвенных измерений:

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{1}{q}\right)^2 (\Delta t_B)^2 + \left(-\frac{1}{q}\right)^2 (\Delta t_H)^2 + \left(-\frac{(\bar{t}_B - \bar{t}_H)}{q^2}\right)^2 (\Delta q)^2}. \quad (11)$$

Окончательный результат косвенных измерений имеет вид

$$R(t_v, t_n, q) = R(\bar{t}_v, \bar{t}_n, \bar{q}) \pm \Delta R. \quad (12)$$

Оценивается относительная погрешность результата серии косвенных измерений

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R} 100\%. \quad (13)$$

Полученные результаты признаются достоверными, если относительная погрешность R_0 не превышает 15%.

Выводы

Тепловизионное обследование ОК является оптимальным методом для быстрого бесконтактного выявления таких скрытых дефектов монтажа, как некачественная заделка оконных откосов при установке светопрозрачных конструкций, неплотность примыканий оконных створок и дверных полотен, недостаточный уровень тепловой защиты различных конструктивных элементов, узлов и деталей. Однако данный метод имеет ряд ограничений: тепловизионное обследование должно проводиться при температурном перепаде между внутренним и наружным воздухом, превосходящем минимально допустимое его значение $\Delta t_{\min} \geq 10,0$ °С, при отсутствии атмосферных осадков, тумана, задымленности воздуха, инея на поверхности, а также прямого солнечного излучения, либо в случае внутренней тепловизионной съемки излучения отопительных приборов и других источников тепла. При обследовании в осенне-зимний период соблюдение всех этих требований крайне проблематично. Колебания температуры наружного воздуха, смена погодных условий в процессе проведения обследования вносят существенный вклад в погрешность измерений. Кроме того, допущения, принятые при выводе формулы (3) для расчета температуры внутренней поверхности ОК, дополнительно увеличивают погрешность данного метода. Поэтому тепловизионное обследование является достаточным только для качественной оценки теплоизоляционных свойств ОК.

При необходимости определения количественных характеристик ОК целесообразно дополнять тепловизионную съемку контактными измерениями температуры и плотности теплового потока. Это позволяет рассчитать тепловой баланс обследуемого объекта и принять меры к снижению затрат на отопление.

Литература

1. ГОСТ 26254-84. Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. – М.: Госкомитет СССР по делам строительства, 1984.
2. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий. – М.: Госстрой РФ, 2003.
3. Могутов В.А. Обобщение опыта натурных экспериментальных обследований объектов ЖКХ // Отчет НИИСФ РААСН. – М., 2005.
4. Кассандрова О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. – М.: Наука, 1970.

| | | |
|--|---|--|
| <i>Кямря Александр Робертович</i> | – | Обособленное подразделение ЦК ИС ФГП «РОССТРО» - ОАО «РОССТРО» - «ПКТИ», начальник физического отдела, tv_pkti@pochta.ru |
| <i>Серебрянникова Наталия Владимировна</i> | – | Обособленное подразделение ЦК ИС ФГП «РОССТРО» - ОАО «РОССТРО» - «ПКТИ», инженер, tv_pkti@pochta.ru |
| <i>Залеская Анастасия Алексеевна</i> | – | Обособленное подразделение ЦК ИС ФГП «РОССТРО» - ОАО «РОССТРО» - «ПКТИ», инженер, tv_pkti@pochta.ru |

УДК 519.63

**СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ
ТРИАНГУЛЯЦИЙ И ТЕТРАЭДРАЛЬНЫХ СЕТОК**

А.А. Данилов

Представлен краткий обзор методов задания геометрии области и построения неструктурированных тетраэдральных сеток. Рассмотрены способы построения поверхностных треугольных сеток – аналитическое задание, взаимодействие с ядром САПР, перестроение имеющейся триангуляции, метод конструктивной блочной геометрии. Рассмотрена комбинация двух методов для построения тетраэдральной сетки внутри области. Представленный набор методов покрывает широкий спектр областей и позволяет строить сетки с заданными свойствами.

Ключевые слова: тетраэдральные сетки, поверхностные триангуляции, САПР, конструктивная блочная геометрия, триангуляция Делоне, алгоритм продвигаемого фронта.

Введение

Одним из наиболее сложных этапов построения дискретной модели в компьютерном моделировании является построение расчетной сетки. Конформные треугольные и тетраэдральные неструктурированные сетки позволяют достаточно точно аппроксимировать сколь угодно сложную геометрию области. Треугольная сетка называется конформной, если любые два треугольника сетки имеют либо ровно одну общую вершину, либо ровно одно целое общее ребро, либо не имеют общих точек. В конформных тетраэдральных сетках любые две ячейки могут иметь также одну целую общую грань. Построение сетки состоит из двух этапов. Сначала строится поверхностная конформная триангуляция области. Затем внутри области строится тетраэдральная сетка, сохраняющая заданный след на границе области.

Существует два основных подхода к построению тетраэдральных сеток – методы, основанные на триангуляции Делоне, и алгоритм продвигаемого фронта. Использование триангуляции Делоне не гарантирует совпадение следа сетки на границе с заданной поверхностной триангуляцией. Для исправления сетки предлагают несколько методик: локальные перестроения сеток [1], измельчение сеток [2], накладывание ограничений на свойства триангуляции Делоне [3]. Метод продвигаемого фронта [4], напротив, сохраняет след сетки на границе области, однако может столкнуться с проблемами внутри области. Перспективным направлением видится комбинация методов Делоне и продвигаемого фронта [5].

В статье представлен краткий обзор некоторых методов построения поверхностных триангуляций, а также предложен метод построения тетраэдральной сетки внутри области на основе комбинации методов продвигаемого фронта и Делоне. В разделе 1 рассмотрены методы построения поверхностных сеток: аналитическое задание области, взаимодействие с ядром САПР, перестроение имеющихся сеток, метод конструктивной блочной геометрии. В разделе 2 кратко описан алгоритм классического продвигаемого фронта, а также метод на основе разбиения Делоне, который предложил Поль Луи Джордж [6]. В разделе 3 обсуждаются способы улучшения качества полученной сетки.

Все рассмотренные алгоритмы реализованы как библиотека программ ApiAFT из пакета Api3D [7]. Вместе с двумерной версией пакета программ Api2D [8] оба пакета предоставляют инструменты для построения неструктурированных сеток, анизотропной адаптации сеток на основе заданной метрики, конечно-элементной дискретизации, решения систем линейных уравнений и другого. Эти пакеты свободно доступны для использования.

Способы задания поверхностной триангуляции

Обычно для построения поверхностной триангуляции всю границу области разбивают на части с общими криволинейными границами. После дискретизации криволинейных границ на поверхности может быть построена триангуляция в каждой части отдельно. Для построения триангуляции можно использовать классический двумерный алгоритм продвигаемого фронта. Так как все части поверхности имеют общую дискретизацию границ, то общая поверхностная сетка получится конформной.

В этом разделе будут рассмотрены следующие способы задания области: аналитическое задание области, взаимодействие с ядром САПР, перестроение начальной поверхностной триангуляции, методы конструктивной блочной геометрии.

С помощью аналитического задания области удобнее всего задавать простые объекты: шар, куб, цилиндр, а также многогранники с плоскими гранями. Более сложные объекты, полученные с помощью пересечения или объединения нескольких простых объектов, удобно задавать с помощью конструктивной блочной геометрии. Еще более сложные объекты, разработанные в САПР, могут быть обработаны с помощью взаимодействия с ядром САПР. Также объект может быть задан в виде поверхностной триангуляции, например, экспортирован из сторонней САПР или получен в результате трехмерного сканирования. В этих случаях может потребоваться дополнительная обработка сетки для улучшения ее качества.

Аналитическое задание области. Этот способ позволяет описывать граничную поверхность области с помощью параметризующих функций. Вся поверхность разбивается на части, каждая из которых может быть параметризована некоторой гладкой функцией. Линии пересечения частей также должны быть явно параметризованы. Этот метод задания границы удобен лишь в очень простых случаях, а также для задания объектов с плоскими гранями.

Информация об области задается как набор параметризованных гладких поверхностей с кусочно-гладкими параметризованными границами. Процесс построения начального фронта сводится к двум основным шагам. Сначала для каждой гладкой линии строится дискретизация с учетом желаемого размера элементов в сетке. Затем для каждой гладкой части поверхности формируется начальный фронт из имеющихся разбиений граничных кривых, и с помощью алгоритма продвигаемого фронта строится поверхностная триангуляция. После построения триангуляция разглаживается с учетом параметризующих функций и функции, задающей желаемый размер элементов сетки в пространстве.

Взаимодействие с САПР. Часто объекты моделируются с помощью САПР. Большинство из существующих САПР предлагают интерфейс для взаимодействия с внутренним ядром и получения информации о топологии и геометрии области. Одним из примеров такой САПР может служить открытая система Open CASCADE Technology [9]. У каждой системы САПР свой интерфейс для взаимодействия, и общих стандартов в этой области пока нет. В качестве универсального интерфейса можно использовать пакет Common Geometry Module (CGM) [10]. Этот пакет также имеет открытый код и свободен для использования. CGM предоставляет общий интерфейс к разным системам САПР (OpenCASCADE, ACIS и Pro/ENGINEER).

Создание интерфейса между генератором сеток и САПР с помощью пакета CGM является сугубо технической задачей. На рис. 1 показаны пример области, заданной в САПР OpenCASCADE, полученная поверхностная триангуляция и разрез построенной тетраэдральной сетки.

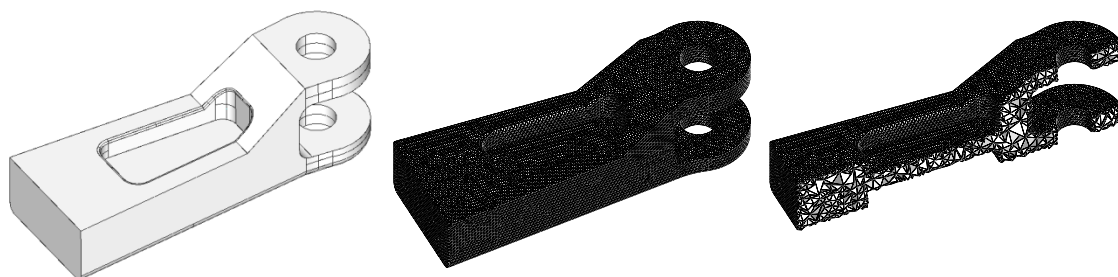


Рис. 1. Пример взаимодействия с САПР (26 248 треугольников, 72 158 тетраэдров)

Перестроение поверхностной сетки. В некоторых случаях область уже может быть задана своей поверхностной триангуляцией. Однако сетки, полученные экспортом из САПР, часто обладают тем свойством, что количество треугольников на плоских участках минимально, а сами треугольники могут иметь разный размер и очень вытянутую форму. В этом случае построение тетраэдральной сетки внутри области с сохранением заданного следа на поверхности может быть сильно затруднено или приведет к сетке с очень плохим качеством.

Для перестроения имеющейся сетки может быть использован метод, основанный на выделении почти плоских участков [11]. Пользователь задает параметры, определяющие допустимую степень отклонения выделяемых участков от плоскостей. Например, это может быть максимальный угол между нормалью треугольника и нормалью к плоскости. Очередной участок выбирается, начиная с треугольника с наибольшей площадью. Далее к нему по очереди добавляются соседние треугольники, если они не нарушают заданных пользователем критериев. После разбиения всей поверхности на почти плоские участки создается новая дискретизация границ этих участков (ломаных линий на поверхности). Далее для каждого участка его граничная дискретизация проектируется на плоскость, в плоскости строится новая триангуляция и проектируется обратно на поверхность. Так как участок поверхности является почти плоским, то искажения геометрии области будут незначительными.

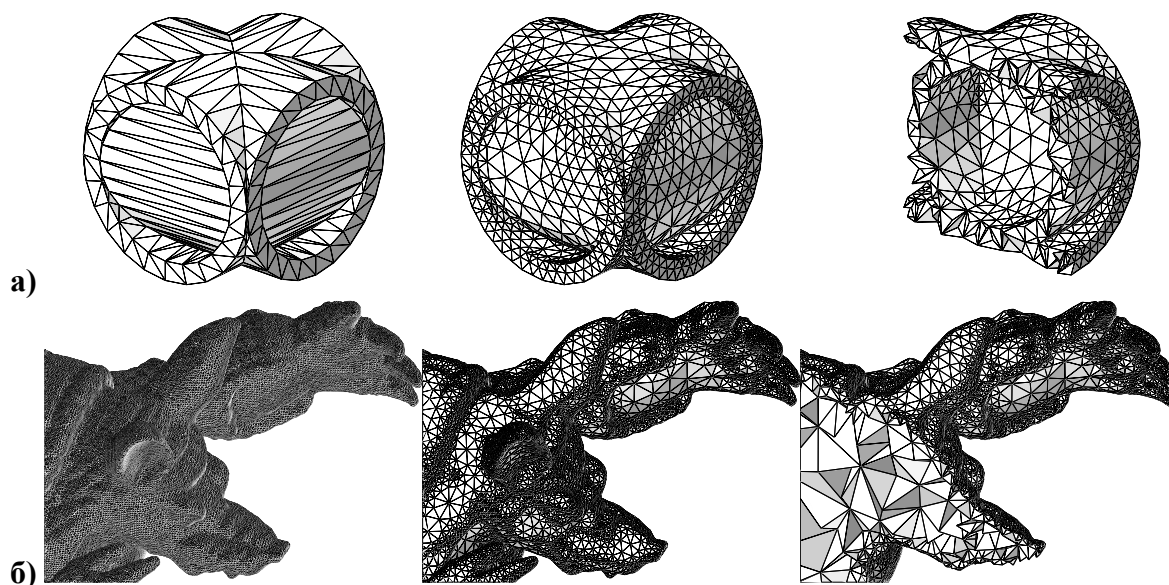


Рис. 2. Два примера перестроения поверхностных сеток: а – экспорт из САПР, в начальной сетке 912 треугольников, в новой – 4 506 треугольников, 21 671 тетраэдр; б – трехмерное сканирование модели, в начальной сетке 345 944 треугольников, в новой – 94 100 треугольников, 217 011 тетраэдров

Тот же метод может быть применен и для разгрубления слишком подробной поверхностной сетки. Например, полученные с помощью трехмерного сканирования сетки обычно содержат очень много треугольников, и часто пользователю не нужна такая подробная поверхностная сетка. За счет разбиения на почти плоские участки и построения более грубой сетки на них можно получить новую поверхностную сетку с меньшим количеством треугольников.

На рис. 2 показаны два примера перестроения сеток. В первом начальная сетка была получена с помощью экспорта из САПР, а во втором – с помощью трехмерного сканирования.

Конструктивная блочная геометрия. Некоторые объекты довольно сложно задать с помощью аналитического представления, и в то же время они достаточно просты, чтобы моделировать их в сложных САПР. Важными примерами таких объектов являются пересечения и объединения простых объектов (примитивов), таких как шар, куб, цилиндр. Такой способ задания объектов принято называть конструктивной блочной геометрией [12].

Для простых примитивов поверхностная сетка строится с помощью аналитического задания области. Далее поверхностные сетки двух примитивов пересекаются, и на их основе строится новая поверхностная сетка для объединения, пересечения или разности двух примитивов. Новый объект, в свою очередь, тоже можно рассматривать как новый примитив. Общая идея пересечения поверхностных сеток состоит в следующем. Сначала строится ломаная линия пересечения поверхностных сеток, разбивающая треугольники в сетках на несколько связанных частей. Далее полоску треугольников вдоль линии пересечения перестраивают заново для конформного соединения нужных частей поверхности. На рис. 3 показаны примеры поверхностных сеток для разных объектов.

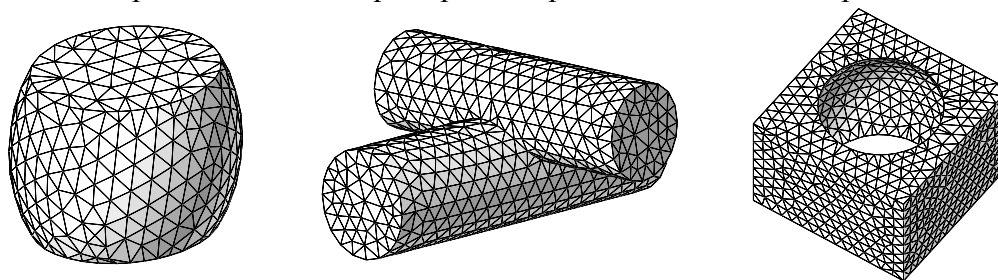


Рис. 3. Примеры сеток для областей, заданных с помощью конструктивной блочной геометрии

Тетраэдральный генератор сеток. После того, как поверхностная сетка построена, можно приступить к построению тетраэдральной сетки внутри области. В этой статье предлагается комбинация двух методов. Первый метод – классический алгоритм продвигаемого фронта. Он срабатывает не всегда и может оставить после работы часть еще не разбитой на тетраэдры области. Для разбиения этих проблемных участков применяется второй метод, основанный на триангуляции Делоне.

Алгоритм продвигаемого фронта используется для построения тетраэдральной сетки внутри заданной ограниченной области. Область задается поверхностной ориентированной конформной триангуляцией, называемой фронтом. После этого шаг за шагом строятся тетраэдры на границе фронта с продвижением его внутрь области. В каждый момент времени текущий фронт отделяет часть с построенной тетраэдральной сеткой от еще не рассмотренной части. Если в конце фронт окажется пустым, то тетраэдральная сетка будет построена для всей области. Если во фронте остаются треугольники, но ни один новый тетраэдр построить не удастся, то алгоритм останавливается, и применяется второй метод, описанный в следующем подразделе.

На каждом шаге из фронта выбирается треугольник с наибольшей площадью, и на нем как на основании строится тетраэдр с учетом желаемого размера элементов сетки. После этого тетраэдр проверяется на пересечения с фронтом. В случае пересечений подбирается другой тетраэдр. Новый тетраэдр добавляется в сетку, а фронт продвигается внутрь области.

Метод позволяет строить сетки в сложных геометрических областях, в том числе анизотропных и имеющих разрезы (рис. 4). Также метод позволяет контролировать желаемый размер элементов сетки и может выбирать его автоматически (рис. 5).

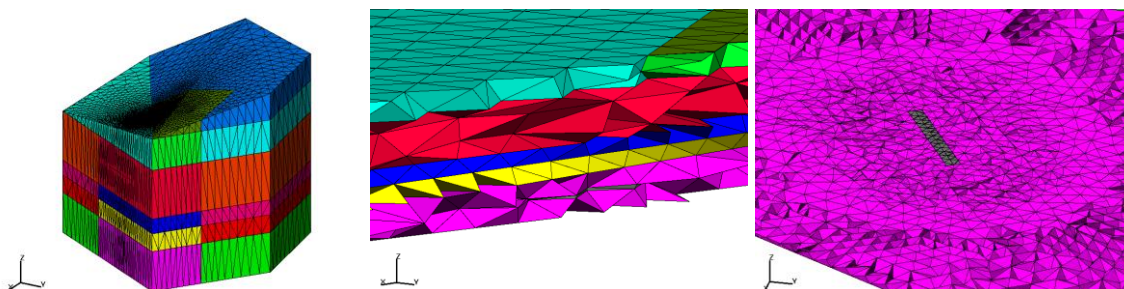


Рис. 4. Пример анизотропной области. Слева область растянута по оси Z в 50 раз. В центре и справа показаны разрезы тетраэдральной сетки плоскостями OXZ и OXY

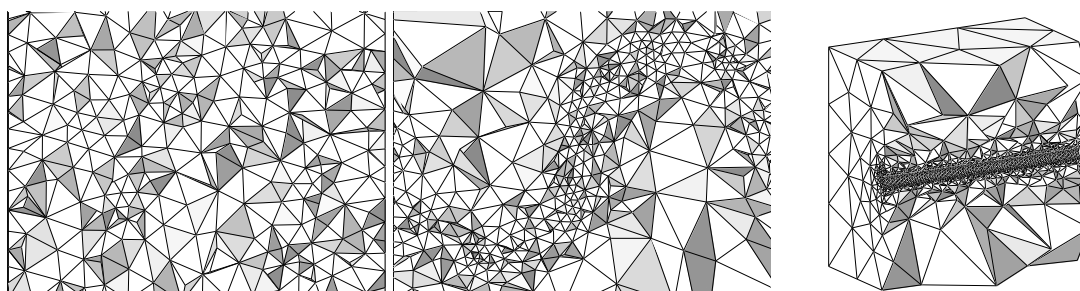


Рис. 5. Квазиравномерный, пользовательский и автоматический выбор шага сетки

Метод на основе разбиения Делоне применяется после алгоритма продвигаемого фронта, когда большая часть сетки уже построена. Здесь представлена только общая идея метода, предложенного П. Л. Джорджем [6]. Сначала для выпуклой оболочки множества вершин фронта строится тетраэдральное разбиение Делоне. Далее нужный фронт пересекается с полученной сеткой, измельчая ее. После этого из сетки выкидываются тетраэдры, лежащие за пределами области. Новая сетка не будет совпадать с заданным фронтом на границе. Для восстановления конформности новые точки пересечения сдвигаются внутрь области. Предложенный метод гарантирует построение сетки, однако она может содержать практически вырожденные элементы.

Улучшение сеток

На практике качество тетраэдральной сетки зависит от качества поверхностной сетки. Как правило, более 95% объема области заполняется сеткой с хорошим качеством с помощью алгоритма продвигаемого фронта. Оставшаяся часть разбивается методом на основе триангуляции Делоне и может иметь элементы с очень плохим качеством. В этом случае необходимо дальнейшее улучшение сетки, часто путем комбинации сдвижки узлов и топологических перестроений сеток [13, 14]. Для этого могут использоваться как простые эвристики, так и сложные методы оптимизации критериев качества [15, 16]. В пакете программ Ani3D имеется мощный инструмент для адаптации сеток – пакет AniMBA.

Заключение

В статье представлен краткий обзор методов, применяемых в библиотеке AniAFT, основным разработчиком которой является автор статьи. Рассмотрены как методы построения поверхностных треугольных сеток, так и алгоритмы для построения тетраэдральных сеток. Представлены некоторые примеры работы алгоритмов.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 08-01-00159-а, 09-01-00115-а и программы Президиума РАН 21-П «Фундаментальные науки – медицине». Автор выражает благодарность Рао Гаримелле за помощь в разработке интерфейса с САПР, Кириллу Никитину за реализацию методов конструктивной блочной геометрии и Юрию Василевскому за поддержку, участие в обсуждениях и ценные советы.

Литература

1. Borouchaki H., Hecht F., Saltel E., George P.-L. Reasonably efficient Delaunay based mesh generator in 3 dimensions // Proc. of 4th IMR. – 1995. – P. 3–14.
2. Du Q., Wang D. Recent progress in robust and quality Delaunay mesh generation // J. of Comp. and App. Math. – 2006. – V. 195. – P. 8–23.
3. Shewchuk J. R. Constrained Delaunay tetrahedralizations and provably good boundary recovery // Proc. of 11th IMR. – 2002. – P. 193–204.
4. Ito Y., Shih A., Soni B. Reliable isotropic tetrahedral mesh generation based on an advancing front method // Proc. of 13th IMR. – 2004. – P. 95–106.
5. Yang Y., Yong J., Sun J. An algorithm for tetrahedral mesh generation based on conforming constrained Delaunay tetrahedralization // Computers & Graphics. – 2005. – V. 29. – P. 606–615.
6. George P.-L., Borouchaki H., Saltel E. 'Ultimate' robustness in meshing an arbitrary polyhedron // Int. J. Numer. Meth. Eng. – 2003. – V. 58. – P. 1061–1089.
7. 3D Generator of Anisotropic Meshes [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sourceforge.net/projects/ani3d/>, свободный. Язык английский.
8. 2D Generator of Anisotropic Meshes [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sourceforge.net/projects/ani2d/>, свободный.
9. Open CASCADE Technology, 3D modeling & numerical simulation [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.opencascade.org/>, свободный.
10. The Common Geometry Module [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cubit.sandia.gov/cgm.html>, свободный.
11. Василевский Ю., Вершинин А., Данилов А., Пленкин А. Технология построения тетраэдральных сеток для областей, заданных в САПР // Матричные методы и технологии решения больших задач (под ред. Е.Е. Тыртышников). – М: ИВМ РАН, 2005. – С. 21–32.
12. Никитин К. Технология построения поверхностных регулярных триангуляций для областей, составленных из примитивов: Дипломная работа. – М.: МГУ, 2007.
13. George P.-L., Borouchaki H. Delaunay triangulation and meshing. Application to finite elements. – Hermes, 1998.
14. Agouzal A., Lipnikov K., Vassilevski Yu. Adaptive generation of quasi-optimal tetrahedral meshes // East-West Journal. – 1999. – V. 7. – P. 223–244.
15. Ivanenko S. Variational methods for adaptive grid generation // Comp. Math. and Math. Physics. – 2003. – V. 42. – P. 830–844.
16. Garanzha V. Max-norm optimization of spatial mappings with application to grid generation, construction of surfaces and shape design // Proc. of Minisym. in Int. Conf. OFEA. – 2001. – P. 61–74.

Данилов Александр Анатольевич

– Институт вычислительной математики РАН, аспирант,
a.a.danilov@gmail.com

УДК 004.414.2

МАРШРУТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ «СИСТЕМ НА КРИСТАЛЛЕ»

П.В. Кустарев, А.О. Ключев

Рассматриваются современные подходы к проектированию вычислительных систем класса «Система на кристалле» (СнК, SoC). Дано определение СнК как технологии проектирования, указаны отличительные признаки данной технологии, показаны недостатки традиционных маршрутов проектирования микро-процессорных систем, в том числе систем на ПЛИС, применительно к СнК. Определены основные направления развития методов и маршрутов проектирования для СнК, рассмотрена общая структура эффективного процесса проектирования СнК. Дано общее описание уровня общесистемного проектирования (ESL), его подуровней, приведены сведения о применяемых языковых и инструментальных средствах. Оценены перспективы СнК, выделены ключевые аспекты технологии, требующие исследования и решения.

Ключевые слова: исполняемая системная спецификация, макроархитектура, микроархитектура, ПЛИС, система на кристалле, СнК, системный уровень.

Введение

С ранних этапов развития и по сегодняшний день вычислительные системы характеризуются архитектурным и технологическим дуализмом: аппаратная и программная компоненты, являющиеся неотъемлемыми частями единой прикладной системы, разрабатываются изолированно друг от друга. Такая ситуация обусловлена, прежде всего, противопоставлением физической природы оборудования и нефизической природы программного обеспечения и вытекающими из этого различиями предмета, методов и критериев проектирования. Создать эффективную, унифицированную для обеих компонент технологию проектирования не позволяли как технические ограничения, так и отсутствие необходимости у разработчиков, продавцов и пользователей.

Итак: оборудование создается как универсальная платформа, а программное обеспечение – как интеллектуальная надстройка, реализующая конкретную прикладную задачу. Такой стиль оставался эффективным многие годы как в сегменте универсальных систем, так и для специализированных встраиваемых компьютеров. Однако, по оценке многих специалистов [1, 2], в последнее время развивается кризис проектирования встроенных систем, связанный с лавинообразным ростом количества, разнообразия и сложности приложений (встроенные компьютеры в любой бытовом, технологическом, научно-исследовательском и другом сложном оборудовании, мобильные устройства и т.п.) Необходимость создания множества приложений в ограниченные сроки повела за собой активное «перетекание» сложнейших технологий программирования и инструментария из сегмента систем общего назначения в сектор встроенных систем. Они потребовали увеличения производительности аппаратной платформы, но сложность оборудования, в свою очередь, потребовала более мощных инструментальных и операционных программных средств, и так далее по кругу. Стало ясно, что возрастающая сложность систем как в программной, так и в аппаратной части «уходит» на поддержание собственной работоспособности и управляемости. Системы становятся сложными, растет число внутренних ошибок, падает надежность.

Одним из возможных путей решения описанной проблемы является упрощение организации вычислительного процесса и архитектуры системы за счет переноса части сложных функций с уровня программного обеспечения на уровень аппаратных средств и, тем самым, устранение сложной иерархии управления и исполнения. Движение в этом направлении наблюдается достаточно давно: например, контроллеры современных систем могут реализовывать сложные функции управления периферийным оборудованием независимо от центрального процессора. Однако невозможность перенастройки оборудования на произвольный прикладной алгоритм сильно ограничивает

полезный эффект. Только с появлением доступных ПЛИС сверхбольших объемов и относительно доступных технологий разработки и производства заказных цифровых СБИС появилась реальная возможность массового проектирования вычислительных систем с аппаратурой, прежде всего СБИС, разработанной специально под задачу. Рост возможностей и популярности таких решений вызвал к жизни мощное направление технических решений, методов и инструментальных средств проектирования, которое будет обсуждаться в этой статье.

Системы на кристалле

Прогресс компьютерных технологий всегда был в большей или меньшей степени обусловлен технологическими прорывами в области электронных систем – созданием транзисторов, интегральных микросхем, достижениями в области технологий передачи данных, появлением и поэтапным совершенствованием микропроцессоров, распространением микроконтроллеров, появлением доступных ПЛИС. К настоящему времени возможности микроэлектроники достигли уровня, когда все элементы сложной вычислительной системы реализуемы в виде одной интегральной микросхемы – «системы на кристалле» (СнК). Очередной этап – вычислительная «сеть на кристалле» (СЕНК).

С технологической точки зрения технологии СнК рассматривают как направление на повышение степени интеграции микросхем для электронных систем с целью уменьшения стоимости производства и габаритов конечных изделий. Однако данное определение не дает ничего для решения поставленной задачи – повышения эффективности вычислительных архитектур. Как считают авторы, СнК интересны прежде всего в качестве технологии, позволяющей добиться реализации прикладной функциональности программно-аппаратным способом с гибко устанавливаемой границей (программы и аппаратуры) или вообще без нее. Поэтому нами предложено следующее определение: *система на кристалле* – это вычислительная система, архитектура которой разработана целевым образом для решения прикладной задачи (или класса задач) и реализована в виде комплекса функционально специализированных аппаратных и программных компонент на базе конфигурируемой микроэлектронной платформы.

Сразу же отметим, что однокристалльная микроЭВМ со встроенным программным обеспечением не будет отнесена к СнК, потому что используются унифицированные аппаратные средства. С другой стороны, «жесткая» цифровая схема, реализованная на ПЛИС, не рассматривается в качестве СнК, если в ней отсутствует программная компонента. С нашей точки зрения, СнК – это не тип микросхем (хотя именно так часто воспринимают СнК – например, в [1]), а технология проектирования на основе программных и аппаратных реконфигурируемых компонент. Данная технология объединяет как ставшие классическими методы и средства разработки программного обеспечения, разработки микросхем на функциональном и физическом уровнях, ПЛИС и т.п., так и относительно новые подходы. Среди последних следует выделить:

- 1) системное (архитектурное) проектирование, ориентированное на использование гетерогенной (аппаратно-программной) программируемой платформы;
- 2) использование библиотечных «аппаратных» блоков, так называемых IP-компонент. В части проектирования аппаратуры подход не нов, но принципиальным является программноподобность IP-блоков (такие блоки называют Soft IP, в противоположность Hard IP – топологическим шаблонам при разработке микросхем), что является основой построения унифицированного программно-аппаратного базиса для построения систем и, в конечном счете, позволяет стереть границу оборудования и программного обеспечения при проектировании.

В завершение параграфа следует отметить еще два момента. Первое: однокристалльное решение – это только один из возможных вариантов реализации, получивший сегодня широкое распространение. К СнК также может быть отнесена структура, состоящая из нескольких СБИС, процессора и специализированной системной логики на базе ПЛИС, или решение на нескольких ПЛИС. Второе: несмотря на то, что хотелось бы достигнуть независимого восприятия СнК и СБИС, на базе которой она реализована, пока возможности СнК достаточно жестко определены ресурсами аппаратуры. Сегодня технология СнК наиболее востребована в сегменте встраиваемых систем с малым и средним уровнем производительности. Однако прогресс не стоит на месте, и, возможно, уже через 10 или чуть больше лет мощные вычислительные системы общего назначения с аппаратной реализацией прикладных функций будут частым явлением.

Направление СнК активно развивается в мире, поддержано ведущими производителями микросхем, разработчиками САПР, исследовательскими организациями. В России, судя по публикациям и известным внедрениям, СнК чаще рассматриваются не более чем удобная элементная база, не затрагивающая привычных (традиционных) технологий проектирования.

Традиционный маршрут проектирования СнК

Проектирование СнК исторически является развитием технологий и средств разработки специализированных ИМС (ASIC) и ПЛИС. Обобщенная схема традиционного маршрута представлена на рис. 1 (данная схема предложена в [1] и немного детализирована в настоящей статье). Процесс является последовательным, с выделением технологических этапов – уровней, и итеративным, т.е. на каждом этапе можно сделать откат назад для корректировки проекта (обратные связи на рисунке не показаны). Проектирование программного обеспечения выполняется обособленно от разработки аппаратных средств, после получения виртуальных или физических прототипов аппаратуры. На всех уровнях используется компонентный подход. Компоненты – функциональные, схемотехнические, топологические и программные блоки – организуются в библиотеки, пригодные для повторного использования.

Фактически описанный маршрут проектирования не имеет никаких принципиальных отличий по сравнению с традиционной технологией создания микропроцессорных систем. Из особенностей следует выделить то, что центральную позицию заняла программируемая пользователем аппаратура (ПЛИС, иногда ASIC), появились средства структурного конфигурирования процессорных ядер, САПР ПЛИС/ASIC, конфигурирования процессорных ядер, пакеты разработки программного обеспечения объединяются в мощные инструментальные комплексы. Примером такого комплекса может быть САПР фирмы Altera для проектирования SOPC (System-On-a-Programmable-Chip) на базе ПЛИС и процессорного ядра NIOS II, который включает базовые пакеты Quartus II (ПЛИС) + SOPC Builder (конфигурируемое процессорное ядро) + NIOS II IDE (программное обеспечение) и много других расширений (DSP Builder, C-to-Hardware Compiler и т.п.). Аналогичный мощный инструментальный комплекс предлагает фирма Xilinx. Чуть отстают, но постоянно развивают свои САПР фирмы Cypress (PSoC Designer), Actel (Smart Design) и некоторые другие. Как видно, в предложенном списке указаны лишь производители микросхем для СнК. Это естественно: они наиболее заинтересованы в продвижении своей продукции и стремятся предложить удобный инструмент, соответствующий привычным для большинства разработчиков технологиям проектирования.

Однако создание систем на кристалле в рамках традиционного маршрута не соответствует определению и принципам проектирования СнК как гетерогенной программируемой платформы. Это, по мнению авторов, существенно ограничивает перспективы технологии СнК. Перечислим наиболее существенные проблемы.

- 1) Системный уровень проектирования хоть и заявлен, но либо упрощен до уровня средств визуального конфигурирования аппаратной части – процессорного ядра, периферийных контроллеров, прикладной логики, либо оторван от последующих этапов, т.е. рассматривается как средство функционального моделирования и не имеет формализованного/автоматизированного перехода к уровням реализации аппаратуры и программного обеспечения, либо вообще отсутствует. Во многом это происходит потому, что проектирование аппаратуры и программного обеспечения разделено методически, инструментально, во времени и, соответственно, нет прямой потребности в обобщающей модели.
- 2) Разработка программных и аппаратных средств выполняется отдельно не только на системном уровне, но и на нижних уровнях (об этом уже сказано выше). Слабы или отсутствуют совместная верификация, тестирование, оптимизация способа реализации. Соответственно основное преимущество СнК – гармоничное и эффективное распределение прикладных функций между аппаратной и программной блоками системы – утеряно.
- 3) В процессе проектирования упор делается на функциональность, распределение доступных аппаратных ресурсов, архитектуру программного обеспечения в рамках выбранной парадигмы программирования. Частично или целиком «за скобками» остаются иные существенные аспекты: мехатроника системы, надежность/безопасность, энергопотребление, техническое сопровождение и другие типовые, а также некоторые узкоспециальные вопросы предметной области. Эта проблема характерна для проектирования любых вычислительных систем, но для СнК как для системы, эффективность которой заключается в ее специализации на всех уровнях, она особенно болезненна.

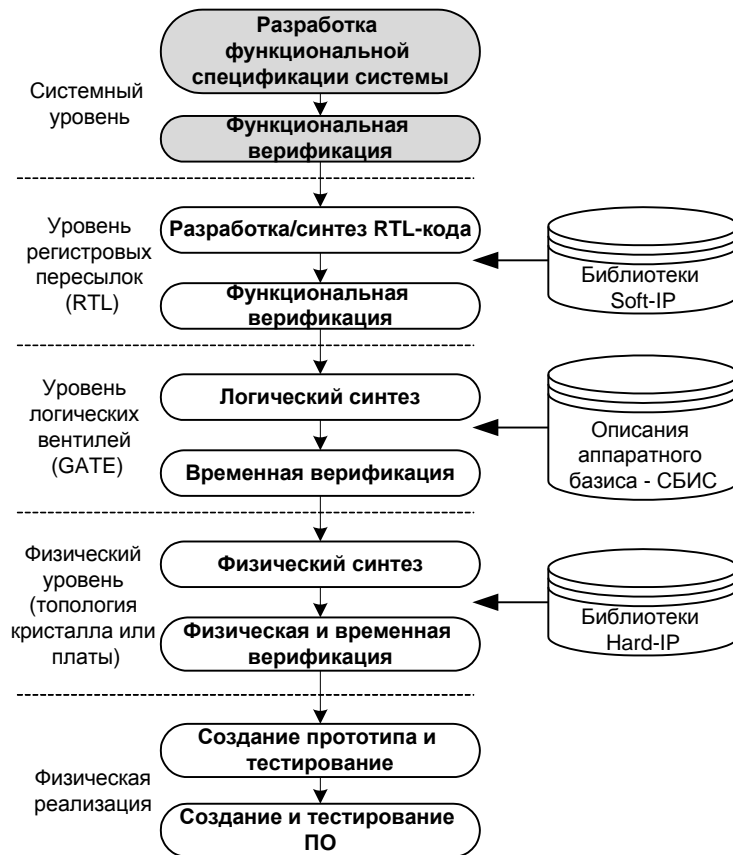


Рис. 1. Обобщенная схема традиционного маршрута

Можно видеть, что основные недостатки относятся к уровню архитектуры и системотехники. Их исследование и преодоление чрезвычайно важны для определения перспектив технологии СнК, но, кроме этого, могут в ближайшем будущем сильно повлиять на изменение парадигмы проектирования вычислительных систем в целом. Наибольший интерес к решению этих вопросов проявляют научно-исследовательские организации и фирмы, занимающиеся созданием систем и средств проектирования высшего уровня сложности. К таковым могут быть отнесены ведущие разработчики «электронных» САПР, имеющие наибольшие практические результаты – Cadence Design Systems Inc., Synopsys Inc., Mentor Graphics Corp., международные и национальные исследовательские организации (следует отметить ведущую роль института IEEE). Большую активность проявляют многие университеты, в большей степени развивающие методологии. В России, несмотря на значительное отставание, данное направление пытаются развивать исследовательские коллективы в ведущих федеральных научных центрах и университетах. На кафедре вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий механики и оптики (СПбГУ ИТМО) эти исследования ведутся в рамках научно-образовательного направления «Встроенные вычислительные системы». Далее представлен общий взгляд на организацию следующего поколения средств проектирования СнК.

Архитектурно-ориентированное проектирование СнК

Как было сказано выше, основные недостатки традиционных маршрутов разработки СнК касаются системного уровня проектирования. Предлагается перенести акцент проектирования именно на этот этап – на проработку архитектуры СнК – путем расширения и детализации решаемых на системном уровне задач. Одновременно для всесторонней оценки результата предлагается распараллелить потоки реализации, верификации и прототипирования синтезированной архитектуры СнК (рис. 2). Такой архитектурно-ориентированный подход к созданию СнК позволяет создавать эффективное специализированное решение для конкретной прикладной задачи в рамках нескольких четко определенных шагов: формирование и анализ архитектурного шаблона на системном уровне, тонкая настройка и взаимное согласование аппаратных и программных компонент в рамках этапов реализации, верификации, прототипирования, адаптация под требования иных существенных аспектов проекта.

Перечислим ключевые особенности архитектурно-ориентированного проектирования СнК.

- 1) Ведущая роль системного уровня [4]. Он существенно усложнен и по структуре (выделено несколько подуровней), и по наполнению. Учитывая влияние аппаратной составляющей на весь процесс и на результат, данный этап проектирования получил название Electronic System Level (ESL). С другой стороны, на этом этапе определяется архитектура системы в целом, поэтому иногда, например в [3], его именуют общесистемным уровнем – Entire System Level, сохраняя ту же аббревиатуру ESL.
- 2) Параллельное, связанное исполнение задач (ранее – последовательных этапов) проектирования. Должна обеспечиваться совместная верификация программных и аппаратных компонент системы и, одновременно, разнообразных требований к системе.
- 3) Среди иных требований с самых ранних этапов реализации СнК учитываются особенности микроэлектронной аппаратуры (СБИС), например, особенности и требования технологии производства современных микросхем, так называемого «глубокого субмикрона».

Рассмотрим кратко состав и назначение подуровней ESL как ключевого компонента перспективного варианта маршрута проектирования СнК.

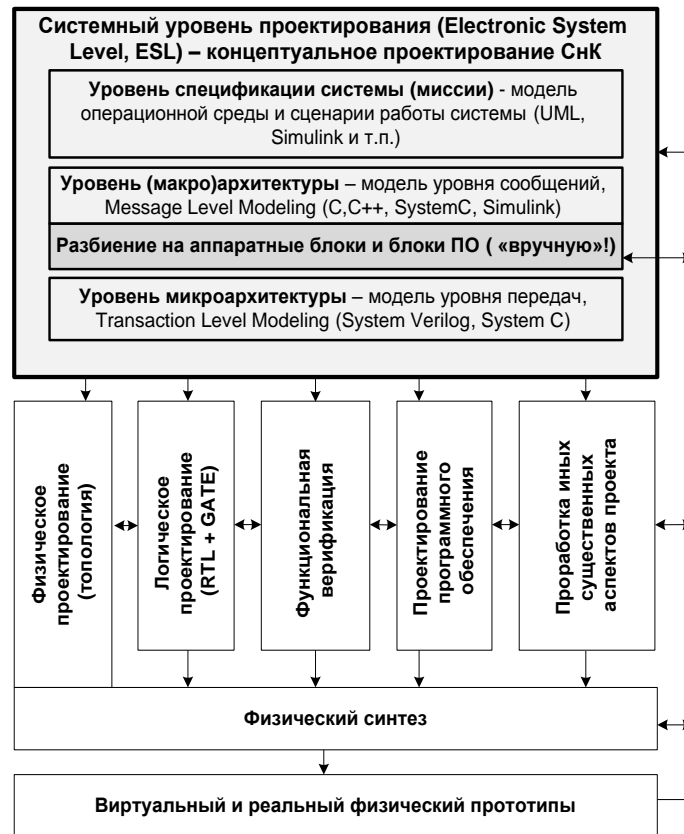


Рис. 2. Распараллеливание потоков в синтезированной архитектуре

На подуровне спецификации системы (определения ее миссии) разрабатывают модель внешнего окружения системы – операционной среды, формальным образом фиксируют и проверяют полноту и непротиворечивость сценариев поведения системы через ее функциональную модель, так называемую «исполняемую системную спецификацию», выполняют первоначальное разделение системы на крупные функциональные блоки и подсистемы. В качестве средств описания системы используются различные языки моделирования: стандартные – UML, SDL и им подобные – или языки (текстовые, графические), встроенные в пакеты моделирования (Simscrip, MathCAD/Simulink и другие). На данном этапе могут использоваться различные инструментальные средства моделирования: универсальные, например, MathCAD/Simulink (MathWorks), или специальные, такие как SystemVision, BridgePointUML (Mentor Graphics) или Saber (Synopsys).

Следующий этап – разработка макроархитектуры СнК. Здесь «исполняемая системная спецификация система» детализируется путем декомпозиции на подсистемы и блоки, реализующие основные внутрисистемные задачи. Выполняется моделирование системы на уровне сообщений – message level modeling (MLM), которое позволяет оценить производительность системы, интенсивность и проблемы внутренних и внешних взаимодействий между блоками и подсистемами. Прикладная функциональность проходит повторную верификацию на уровне с большей детализацией. Важно, что на уровне макроархитектуры сохраняется абстрактная, т.е. не привязанная к способу реализации – аппаратной или программной, природа функциональных блоков и подсистем. Как и на предыдущем уровне, могут использоваться универсальные (MathCAD/Simulink – MathWorks) или специальные (Vista – Mentor Graphics, Incisive Palladium – Cadence) пакеты моделирования.

Следующий этап выбора способа реализации для каждого функционального блока системы, или, иначе, программно-аппаратной декомпозиции, является одним из са-

мых важных в технологии СнК, но пока он наименее формализован и автоматизирован. В этой области ведутся активные исследования, существует достаточно много частных (по прикладным областям) или фрагментарных решений, но в целом результат можно оценить на 20–40% относительно иных этапов уровня ESL.

Наконец, на этапе микроархитектуры выполняется детальный анализ выбранной функциональной структуры системы и программно-аппаратной декомпозиции. Моделируются интерфейсы и взаимодействие между аппаратными и программными компонентами, отлаживаются методы и протоколы внутрисистемного управления и синхронизации функциональных блоков, подготавливаются спецификации и среда верификации для последующего проектирования аппаратной части на RTL-уровне, анализируются и выбираются аппаратные и программные платформы (семейства ПЛИС, ASIC, операционные системы, инструментальные средства проектирования). По результатам проектирования микроархитектуры должны быть разработаны детальные спецификации на техническое проектирование аппаратных и программных средств.

Уровень микроархитектуры наиболее поддержан в методическом и инструментальном плане: используется стандартная методология Transaction Level Modeling (TLM) – стандарт OSCI TLM версий 1 и 2; модели разрабатываются на специальных языках SystemC и SystemVerilog или на универсальном языке C/C++. Доступны специальные САПР: SystemArchitect, Visual Elite, PlatformExpress (MentorGraphics), DesignWare(Synopsys), Incisive Palladium/Enterprise Simulator (Cadence).

Заключение

Приведенные оценка текущего состояния и краткий обзор перспективных подходов и маршрутов проектирования вычислительных систем в рамках технологии СнК показывают: есть представление о цели и направлении развития, есть заинтересованность пользователей и разработчиков методов и средств проектирования как за рубежом, так и в России, более того, есть видимые результаты, например, специализированные САПР. Однако в реальном применении данные методы, технологии и инструментарий пока показывают себя «сырыми» – фрагментарными, сложными и не всегда эффективными. В особой мере это касается уровней макроархитектуры и этапа аппаратно-программной декомпозиции. Отсутствие сколько-нибудь приемлемого уровня формализации и автоматизации именно на этих этапах проектирования на сегодня является «камнем преткновения» на пути развития технологий разработки не только СнК или встраиваемых систем, но и, в значительной степени, вычислительных систем в целом.

Несмотря на перечисленные проблемы, технология СнК остается одной из самых привлекательных и многообещающих на ближайшее десятилетие. Исследовательские работы в этой области активно поддерживаются международным и российским университетским сообществом. В частности, в СПбГУ ИТМО на базе лаборатории «Интегральные вычислители» и вновь создаваемого Национального исследовательского центра «Интеллектуальные системы управления и обработки информации» ведутся работы по исследованию и разработке новых методов и инструментальных средств высокоуровневого проектирования вычислительных систем, а также реализуются прикладные проекты на базе СнК.

Литература

1. Евтушенко Н.Д., Немудров В.Г., Сырцов И.А. Методология проектирования систем на кристалле. Основные принципы, методы, программные средства // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. – 2003. – №3.

2. Бухтеев А.В. Методы и средства проектирования систем на кристалле. – Chip News. – 2003. – № 4.
3. Немудров В.Г., Мартин Г. Системы-на-кристалле. Проектирование и развитие. – М.: Техносфера, 2004. – 216 с.
4. Nicolaos S. Voros, Konstantinos Masselos System level design of reconfigurable systems-on-chip. – Springer, 2005.

Кустарев Павел Валерьевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, bva@tinuviel.ru

Ключев Аркадий Олегович

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, kluchev@lmt.ifmo.ru

УДК: 681.3

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДЕРЕВЬЕВ АТАК

С.А. Арустамов, Ю.А. Гатчин, А.Л. Липатов, А.С. Григорьева

Доказывается актуальность проблемы обеспечения безопасности ключевых систем (КС), проведен анализ основных угроз информационной безопасности (ИБ), разработана расширенная модель управления ИБ, развита методология деревьев атак как базис для разработки средств защиты КС. Разработаны расширенный параллельный автомат для моделирования и обнаружения фактов реализации атак на ключевые системы и расширенный параллельный автомат моделирования собственно деревьев атак. Проведен эксперимент с использованием программного обеспечения, моделирующего атаки и их элементы, результаты которого подтверждают эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: ключевые системы критически важной инфраструктуры, модели систем, угрозы информационной безопасности, деревья атак, параллельный автомат, моделирующий атаки.

Введение

Актуальность проблемы обеспечения информационной безопасности (ИБ) ключевых систем (КС), входящих в состав критически важной информационной инфраструктуры (КСИИ) органов государственной власти (ОГВ) Российской Федерации обуславливается современными условиями ведения деятельности на критически важных объектах информационной и телекоммуникационной инфраструктуры РФ: наличием растущей зависимости бизнес-процессов от информационно-коммуникационных технологий (ИКТ), сложностью используемых технологий, а также большим количеством потенциальных угроз ИБ как случайного, так и преднамеренного характера, включая терроризм, реализация которых может приводить к значительным негативным последствиям для безопасности государства в информационной сфере и препятствовать реализации Российской Федерацией своих целей во внутренней и внешней политике. В настоящей работе предлагается развитие методологии обеспечения безопасности информационных систем на основе деревьев атак, позволяющее внести значительный вклад в решение упомянутых задач.

Общесистемные решения по модели системы информационной безопасности ключевой системы

ИБ КСИИ должна обеспечиваться на комплексной и системной основе в масштабах всего критически важного объекта информационной и телекоммуникационной инфраструктуры РФ, в рамках системы информационной безопасности (СИБ) КСИИ. СИБ КСИИ образуется комплексом технических, программных и программно-технических средств обеспечения ИБ, процессов и персонала, объединенных на основе модели расширенной управления ИБ. Общая модель СИБ КСИИ приведена на рис. 1.

Расширенная модель управления ИБ (EPDCA-модель: Extended «Plan – Do – Check – Act»-модель; расширенная «Планирование–Реализация–Проверка–Улучшение»-модель), реализуемая в рамках СИБ КСИИ, должна базироваться на основе PDCA-цикла Шухарта–Деминга (рис. 2). При этом, в отличие от [1], при создании СИБ КСИИ целесообразно установить жесткие требования по реализации защитных мер эксплуатационного характера (отвечающих за обеспечение ИБ), таких как защитные меры, направленные на обеспечение

безопасности, связанной с персоналом, управление инцидентами ИБ, обеспечение непрерывности деятельности и др. Внедрение данных защитных мер не является обязательным и осуществляется по результатам оценки рисков ИБ, если эти риски ИБ являются неприемлемыми.

Кроме того, в отличие от [2], предлагается не устанавливать жесткие требования к реализации всех защитных мер эксплуатационного характера, описанных, в том числе, в [1], по результатам присвоения КСИИ в соответствии с положениями [3] определенного класса защищенности. В отличие от [1], на этапе «Планирование» («PLAN») PDCA-цикла предлагается осуществлять работы по специальным исследованиям (СИ) основных технических средств (ОТС) КСИИ на ПЭМИН (в случае обработки в КСИИ конфиденциальной информации), а также работы по специальным проверкам ОТС КСИИ на предмет выявления возможно внедренных в них закладных устройств («закладок»).



Рис. 1. Общая модель СИБ КСИИ



Рис. 2. Расширенная модель управления ИБ (EPDCA-модель) СИБ КСИИ

Организация СИБ КСИИ должна быть основана на следующих принципах:

- комплексность – использование комплексного подхода, предусматривающего применение организационных, процедурных, правовых и технических мер;
- системность – использование системного подхода, предусматривающего объединение всех используемых мер на основе заданной модели управления ИБ;
- управление рисками – оценка рисков возможных инцидентов ИБ и принятие решений по их обработке на основании установленных критериев риска;
- мониторинг – оперативное обнаружение инцидентов ИБ и реагирование на них;
- совершенствование – оценка эффективности функционирования СИБ КСИИ с целью принятия корректирующих и предупреждающих действий и определения возможных улучшений;
- адекватность защитных мер – эффективность защитных мер и их стоимость должна быть адекватной имеющимся рискам.

Разработка перечня угроз информационной безопасности применительно к активам ключевых систем

Для осуществления эффективного управления ИБ КСИИ в рамках расширенной модели управления необходимо осуществить разработку перечня угроз ИБ с указанием типов активов КСИИ, на которые данные угрозы ИБ могут воздействовать. Данная информация приведена в таблице и позволяет при оценке рисков ИБ КСИИ в процессе управления ИБ КСИИ учитывать тот факт, что в целом каждая конкретная угроза ИБ воздействует только на определенные типы активов КСИИ. В таблице приведен перечень угроз с указанием типов активов, на которые они могут воздействовать.

| Название угрозы ИБ КСИИ | Активы КСИИ | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|--------------|----------------------|--------------|------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|----------------|---------------|----------------------|--------------------------|
| | Информационные активы КСИИ | Сервисы КСИИ | Рабочие станции КСИИ | Серверы КСИИ | Активное сетевое оборудование КСИИ | Структурированные кабельные сети КСИИ | Внешние каналы связи КСИИ | Помещения КСИИ | Площадки КСИИ | Внешние сервисы КСИИ | Носители информации КСИИ |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1. Фальсификация полномочий (FGR) | • | • | | | | | | | | | |
| 2. Злоупотребление полномочиями (ABR) | • | • | | | | | | | | | |
| 3. Применение вредоносного программного обеспечения (IDS) | | | • | • | • | | | | | | |
| 4. Недопустимое использование оборудования (MEQ) | | | • | • | • | | | | | | |
| 5. Угрозы уровня сетевых интерфейсов (NI) | | | • | • | • | • | • | | | | |
| 6. Угрозы уровня межсетевых взаимодействий (NE) | | | • | • | • | | • | | | | |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7. Угрозы уровня приложений (APP) | | | • | • | • | | | | | | |
| 8. Отказ от действий (DEN) | | • | | | | | | | | | |
| 9. Сбой в работе внешнего сервиса (FS) | | | | | | | | | | • | |
| 10. Внедрение вредоносного мобильного кода (MC) | • | • | | | | | | | | | |
| 11. Технический сбой в работе оборудования (FEQ) | | | • | • | • | | | | | | |
| 12. Сбои в сети электропитания (FEL) | | | | | | | | • | • | | |
| 13. Сбои в работе систем вентиляции и кондиционирования (FCN) | | | | | | | | • | • | | |
| 14. Сбои в работе программного обеспечения (FSF) | | | • | • | | | | | | | |
| 15. Ошибки персонала (HE) | • | • | • | • | • | | | | | | |
| 16. Пожар (FIRE) | | | | | | | | • | • | • | |
| 17. Затопление (WTR) | | | | | | | | • | • | • | |
| 18. Катастрофы (MA) | | | | | | | | | • | • | |
| 19. Нехватка персонала (HUN) | | | • | • | • | | | | | | |
| 20. Кража (THF) | | | | | | | | • | • | • | • |
| 21. Вандализм (VAN) | | | | | | | | • | • | • | |
| 22. Использование нелегального ПО (NLS) | | | • | • | | | | | | | |
| 23. Несанкционированное визуальное ознакомление с информацией (VIS) | • | | | | | | | | | | |
| 24. Утечка при утилизации оборудования и носителей (DIS) | • | | | | | | | | | | |
| 25. Разглашение информации (DSCL) | • | | | | | | | | | | |
| 26. Недостаточность функциональных характеристик (IEF) | | | • | • | • | | | | | | |
| 27. Утечка / воздействие на информацию по техническим каналам (DTC) | • | | • | • | • | • | • | | | | |

Таблица. Перечень угроз ИБ с указанием типов активов КСИИ, на которые данные угрозы могут воздействовать

Применение методологии деревьев атак

Рассмотрим использование методологии деревьев атак для моделирования и обнаружения инцидентов информационной безопасности в расширенной модели управления информационной безопасностью ключевых систем.

Деревья атак являются формальным методом моделирования реализации угроз ИБ в отношении КСИИ (атак). Атаки представляются в виде деревьев, где корнем является цель атаки, ближайшие узлы – подцелями, а листья – способами достижения подцелей и реализации атаки на основную цель. Дочерние узлы в дереве могут быть двух типов: И (операция «логическое И») и ИЛИ (операция «логическое ИЛИ»). Для реализации атаки необходимо обойти все дочерние узлы типа И или хотя бы один узел типа ИЛИ. Дерево атак при этом формируется следующим образом. Определяются потенциальные

цели атаки. Каждая цель атаки является корнем собственного дерева атак, при этом рассматриваются все возможные атаки на заданные цели. Эти атаки формируют дочерние узлы И и ИЛИ, и каждая из атак рассматривается как цель и формирует ее дочерние узлы. Данный процесс продолжается рекурсивно.

При такой структуре дерева сценарий атаки является поддеревом, которое включает узел – цель, а также все его дочерние узлы И и хотя бы один узел ИЛИ. Подобным образом определяются все поддеревья для дочерних подцелей. Дерево атак является законченным, если оно содержит поддеревья для всех возможных атак, ведущих к достижению главной цели. Для каждого узла можно назначить атрибут (например, время жизни (ВЖ) и др.). Используя такие атрибуты, можно выявить атаки с определенными параметрами, что может быть полезно для определения угроз и требуемых защитных мер.

Автомат деревьев обрабатывает входное дерево, начиная от листьев и заканчивая корнем.

Разработка расширенного параллельного автомата для моделирования и обнаружения фактов реализации атак на ключевые системы

Предлагается ряд модификаций дерева атак для повышения его эффективности при оценке рисков реализации угроз ИБ в отношении активов КСИИ. Во-первых, существуют деревья атак, в которых цели или подцели могут быть достижимы, если все потомки типа И обходятся в заданной последовательности. В этом случае невозможно использовать потомков И или ИЛИ для формирования заданного порядка. Например, «Отключение клиента» в сети WLAN можно реализовать, выполнив атаки типа «Подслушивание MAC-адреса точки доступа», «Подмена AP» и «Отправление сообщения об отключении MAC-адреса жертве» в заданной последовательности. Такие типы потомков назовем У-И (операция «упорядоченное И»).

Еще одна модификация – учет времени жизни (ВЖ) и атрибутов конфиденциальности узла. Атрибут ВЖ определяет время жизни для событий на листьях и для подцелей. В примере «Отключение клиента» клиент получает сообщение «отключен» от точки доступа, но пытается восстановить соединение. Клиент осуществляет последовательность определенных операций для восстановления соединения. Эти операции включают поиск точки доступа с лучшим сигналом, выбор способа аутентификации и подключение к выбранной точке доступа. Атакующий имеет ограниченное время на завершение атаки до того, как жертва восстановит подключение. Таким образом, если с момент достижения подцели прошло времени больше, чем ВЖ, то подцель становится неактуальной. ВЖ позволяет снизить количество ложных срабатываний, что является одной из основных проблем систем обнаружения вторжений, используемых в КСИИ.

Дадим следующее определение. Расширенное дерево атак (РДА) – это дерево атак, в котором дочерние узлы могут быть узлами типа И, У-И или ИЛИ, при этом узлы имеют атрибуты ВЖ и степень конфиденциальности (СК).

Механизм аутентификации протокола 802.1x можно обойти путем перехвата сеанса аутентификации или с использованием атаки типа «Человек посередине», чтобы получить аутентификационную информацию пользователя. Каждое событие имеет атрибут ВЖ, каждая подцель имеет атрибуты СК и ВЖ, а каждое ребро имеет тип И, У-И или ИЛИ. Для достижения цели атакующий должен выполнить атаку «Перехват сеанса аутентификации 802.1x» или «Человек посередине в сеансе 802.1x». Подцель «В-Перехват сеанса аутентификации 802.1x», в свою очередь, может быть достигнута за счет подцели «Отключение клиента» и «Подмена аутентифицированного клиента 802.1x» в заданном порядке (У-И). Построение дерева продолжается, пока не будут созданы все листья, описывающие все возможные события.

В качестве примера рассмотрим ситуацию, когда пользователь проходит процесс аутентификации 802.1x, используя аутентификационную информацию другого активного пользователя. В этом случае можно сделать вывод, что дерево атак не полностью построено, так как атакующий перехватывает сеанс и легальный пользователь пытается подключиться, или атакующий уже получил аутентификационную информацию пользователя с использованием атаки «Человек посередине» (например, подобрав слабый пароль, используя шпионское ПО, методы социальной инженерии и т.п.). Таким образом, дерево не только моделирует атаку, но и является средством самодиагностики для проверки законченности моделей известных атак.

Разработка расширенных автоматов деревьев атак

Существует несколько недостатков недетерминированных конечных автоматов деревьев (НКАД), в связи с чем они не подходят для использования с расширенными деревьями атак. Во-первых, НКАД предполагает дерево в качестве входа, обрабатывая его, когда достигается финальное состояние. В нашей системе входом является поток сообщений, среди которых ищутся конкретные деревья.

Логическая переменная x принимает значение *true*, если соответствующее событие x появляется во входном потоке не позже, чем $VЖ(x)$. Переменная принимает значение *false*, если событие не появляется или если появляется ранее, чем $VЖ(x)$.

Расширенный автомат атак обеспечивает следующие функциональности: обнаружение атак, обнаружение частей атак, проверку законченности дерева атак. Расширенный автомат атак основан на НКАД, но улучшен путем ведения состояний частей атак наряду с финальными состояниями, деривационных правил для подцелей и правил обратных переходов для отката автомата, когда истекает время жизни для события или подцели. Входом автомата является поток значений целочисленных переменных, принимающих значения от 1 до n . Когда автомат достигает одного из состояний части атаки, он сообщает об атаке с атрибутом СК. Когда автомат достигает одного из состояний, он сообщает об атаке в совокупности с последовательностью событий, которые к ней привели. Автомат автоматически сбрасывается в начальное состояние, когда достигается финальное состояние, и продолжает обрабатывать входной поток.

Расширенный автомат деревьев получается из расширенного дерева атак, т.е. создается для обнаружения единственного дерева, формируемого из потока входных значений. Более сложные атаки, которые являются комбинацией нескольких расширенных деревьев атак, могут быть обработаны двумя способами. Во-первых, можно создать отдельный расширенный автомат деревьев атак для каждого расширенного дерева атак и передать копию входного потока в каждый автомат. Во-вторых, можно создать расширенный параллельный автомат, который является комбинацией расширенных деревьев атак и использует единый входной поток для параллельного обнаружения нескольких атак.

Результаты эксперимента

Эксперимент проводился с использованием специального ПО, имитирующего поведение системы обнаружения атак и генератора событий. Генерируемые события представляли собой как элементы атак на протокол 802.11, так и обычные сетевые события. Генератор событий отправлял как случайные события со случайными интервалами времени, так и детерминированные последовательности, имитирующие атаки или их элементы. Определялась зависимость количества ложных срабатываний от процента сообщений, свидетельствующих об атаке, в общем потоке сообщений. Результаты эксперимента доказывают эффективность предложенного подхода по использованию ме-

тодологии деревьев атак в процессе оценки рисков ИБ КСИИ в рамках расширенной модели управления ИБ.

Заключение

Приведены общесистемные решения по модели СИБ КСИИ. Приведена расширенная модель управления ИБ, реализуемая в рамках СИБ КСИИ, базирующаяся на основе PDCA-модели Шухарта–Деминга.

Выявлен перечень угроз ИБ с указанием типов активов КСИИ, на которые данные угрозы ИБ могут воздействовать, а также перечень угроз ИБ КСИИ с указанием уязвимостей, при помощи которых данные угрозы могут быть реализованы; эти перечни необходимы для эффективного управления ИБ в рамках разработанной расширенной модели управления ИБ КСИИ.

Осуществлена разработка расширенного дерева атак, расширенных автоматов деревьев атак, расширенного параллельного автомата, используемых для эффективного моделирования и обнаружения инцидентов ИБ в рамках расширенной модели управления ИБ КСИИ.

Литература

1. Нормативно-методический документ «Методика определения актуальных угроз безопасности информации в ключевых системах информационной инфраструктуры». – М.: ФСТЭК России, 2008.
2. ISO/IEC 27002:2005 Information technology. Security techniques. Code of practice for information security management.
3. Нормативно-методический документ «Базовая модель угроз безопасности информации в ключевых системах информационной инфраструктуры». – М.: ФСТЭК России, 2008.

| | | |
|---------------------------------------|---|--|
| <i>Арустамов Сергей Аркадьевич</i> | – | Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, sergey.arustamov@gmail.com |
| <i>Гатчин Юрий Арменакович</i> | – | Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, gatchin@mail.ifmo.ru |
| <i>Липатов Алексей Леонидович</i> | – | ЗАО "ОТКРЫТЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 98", технический руководитель направления отдела информационной безопасности, alipatov@ot.ru |
| <i>Григорьева Анастасия Сергеевна</i> | – | Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студентка, uojik2@yandex.ru |

УДК 519.86

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОНОМИКИ КИРОВСКОЙ ОБЛАСТИ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО
ПРОГРАММИРОВАНИЯ****Н.Н. Оленёв, А.И. Фетинина**

Моделирование сложных экономических систем представляет собой создание динамических моделей, содержащих большое количество параметров. Для идентификации таких моделей удобно использовать параллельные вычисления путем сканирования сетки интервалов искомых параметров. Верификация модели происходит по статистическим временным рядам макропоказателей экономики. Адекватность модели оценивается на основе максимизации свертки критериев близости расчетных и статистических данных. Параллельная программа идентификации модели написана на языке C++ с использованием интерфейса передачи сообщений MPI и реализована на кластерном суперкомпьютере Вятского государственного университета. По идентифицированной модели рассчитано несколько сценариев развития экономики Кировской области, позволяющих сделать оценку сложившейся в экономике региона ситуации.

Ключевые слова: динамическая модель, развивающаяся экономика, идентификация, параллельные вычисления, эффективный капитал, валовой региональный продукт, прогноз, сценарий.

Введение

Динамическое моделирование развивающейся экономики – довольно сложный и трудоемкий процесс. Чем более сложную модель мы используем для описания реального состояния экономики, тем большим оказывается количество используемых в ней параметров, тем сложнее идентифицировать такую модель. Будем применять появившийся в наше время способ идентификации параметров модели с помощью параллельных вычислений на высокопроизводительных кластерных системах.

Параллельное программирование позволяет использовать для вычислений не один процессор, как это было совсем недавно, а огромное число доступных процессоров, чтобы ускорить процесс вычисления. Таким образом, использование высокопроизводительных вычислений и систем позволяет рассматривать более сложные математические модели экономики с большим числом параметров и, следовательно, более адекватно оценивать реальное состояние экономики.

Перебор параметров по сетке с заданным шагом дает возможность найти набор параметров, дающий наилучшее приближение рассчитанных с помощью модели временных рядов показателей экономики к их статистическим аналогам. Для этого разрабатываются специальные критерии близости и похожести для статистических и рассчитанных по модели временных рядов макропоказателей изучаемой экономической системы страны или региона. Возможно использование свертки критериев, а также решение многокритериальных задач оптимизации. С развитием высокопроизводительных систем эта задача может быть значительно упрощена и сведена к минимуму затрат. Благодаря этому создание математических моделей в наши дни осуществляется, в основном, с использованием различных компьютерных технологий [1, 2].

Модель экономики России рассмотрена в [3]. На ее основе рассмотрена подобная модель, модернизированная для региональной экономики. Существенное различие модели экономики области от модели экономики страны состоит в большей открытости областной экономики, так что для использования модели [3] на региональном уровне ввоз продукции из других российских регионов надо добавлять к импорту, а вывоз продукции в регионы – к экспорту.

Программа была переписана со встроенного языка в системе MATLAB на язык C, чтобы ускорить выполнение работы по идентификации модели за счет высокоскоростных вычислений в системе LAM-MPI, установленной на кластерном суперкомпьютере Вятского государственного университета ИР НРС Enigma X000 «Гатьяна». Для исполнения процедуры параллельного перебора параметров при выборе наилучшего приближения используется интерфейс передачи сообщений MPI (Message-Passing Interface) как наиболее распространенной технологии, применяемой для программирования многопроцессорных систем с распределенной памятью. MPI использует систему передачи сообщений для взаимодействия параллельных процессов. В настоящее время MPI входит в стандартный комплект программного обеспечения практически любого многопроцессорного вычислительного комплекса [4].

Постановка задачи

Будем измерять валовой региональный продукт (ВРП) Кировской области в постоянных ценах 2000 г. Считаем, что ВРП Кировской области $Y(t)$ определяется однородной производственной функцией с постоянной эластичностью замещения,

$$Y(t) = Y_0 \left[a(L/L_0)^{-b} + (1-a)(K/K_0)^{-b} \right]^{-1/b}, \quad (1)$$

где $Y_0, L_0, K_0, a \in (0,1), b$ – параметры. Параметры производственной функции обычно определяют изолированно от других параметров модели по данным экономической статистики для временных рядов тех переменных, которые непосредственно входят в производственную функцию. Но на исследуемом промежутке времени 2000–2007 г.г. статистические значения капитала имеют отдаленную связь с капиталом, фактически используемым в общественном воспроизводстве, как в экономике страны [3], так и в экономике Кировской области. Так, учитываемый статистикой объем областного выпуска не имел постоянной тенденции, незначительно варьируясь как в сторону снижения, так и в сторону увеличения, число занятых в экономике снижалось, а статистически оцениваемый объем капитала практически не менялся. На выпуск же оказывает влияние только капитал, вовлеченный в процесс воспроизводства, имеющий объективную стоимость, некий «эффективный» капитал, который выражен в постоянных ценах 2000 г. Его величину мы и попытаемся здесь оценить [5].

Труд, измеряемый в рассматриваемой модели среднегодовым числом занятых в народном хозяйстве области, меняется в соответствии с заданной функцией времени $F(t)$, параметры которой находятся по статистике,

$$L(t) = L(0) \cdot F(t), \quad L(0) = L_0. \quad (2)$$

Капитал (эффективная стоимость производственных фондов)

$$dK/dt = J(t) - \mu K(t), \quad K(0) = K_0, \quad (3)$$

где $\mu > 0$ – темп выбытия (амортизации) капитала. Пусть в каждый момент времени t выполняется продуктовый баланс

$$Y(t) + s(t)I(t) = Q(t) + p(t)J(t) + r(t)E(t), \quad (4)$$

где объемные показатели – $Y(t)$ (валовой региональный продукт, ВРП, выпуск), $J(t)$ (объем инвестиций), $E(t)$ (объем ввозимой продукции), $I(t)$ (объем вывозимой продукции), $Q(t)$ (объем потребления домашних хозяйств, государственных и общественных организаций в ценах выпуска) – заданы в постоянных ценах 2000 г., а индексы цен – $s(t)$ (относительный индекс цен на импорт), $p(t)$ (относительный индекс цен на инвестиции), $r(t)$ (относительный индекс цен на экспорт) – заданы в относительных величинах: $s(2000) = p(2000) = r(2000) = 1$.

На основе статистических данных Кировской области 2000–2007 г.г. найдем параметры, по которым в этот период определялись объемы инвестиций $J(t)$, ввоза $E(t)$ и вывоза $I(t)$ в постоянных ценах 2000 г. из известного объема выпуска валового регионального продукта (ВРП) $Y(t)$. В качестве таких параметров возьмем отношения δ , $\rho(t)$ и $\sigma(t)$ вывозимой из области продукции, ввозимой в область продукции и инвестиций к выпуску в текущих ценах,

$$r(t)E(t) = \delta Y(t), \quad s(t)I(t) = \rho(t)Y(t), \quad p(t)J(t) = \sigma(t)Y(t). \quad (5)$$

Здесь, согласно статистическим данным, отношения $\rho(t)$, $\sigma(t)$ инвестиций и импорта к объему выпуска Кировской области возрастали практически линейно по времени. Для идентификации модели надо задать изменение внешних интенсивных параметров модели – трех относительных цен $r(t)$, $s(t)$, $p(t)$, определить два возрастающих параметра $\rho(t)$, $\sigma(t)$, пять постоянных параметров $a, b, \gamma, \mu, \delta$ и три начальных значения Y_0, K_0, L_0 таким образом, чтобы расчетные временные ряды макропоказателей (переменных модели) были близки к статистическим временным рядам соответствующих макропоказателей экономики Кировской области.

Основной результат

Из (5), согласно статистическим данным по использованию ВРП для периода с 2000 по 2007 год, определим долю δ экспорта в ВРП:

$$\delta = 0,831 \pm 0,042, \quad (6)$$

где первая цифра означает среднее значение, а вторая – стандартное отклонение; отношение $\rho(t)$ объема ввозимой продукции к ВРП аппроксимируем линией тренда

$$\rho(t) = a_1 + a_2(t - 2000), a_1 = 0,680 \pm 0,031, a_2 = 0,060 \pm 0,007, \quad (7)$$

а отношение $\sigma(t)$ объема инвестиций в основной капитал к ВРП определим как

$$\sigma(t) = \begin{cases} a_3, & t \leq 2003, a_3 = 0,1115 \pm 0,0008; \\ a_4 + a_5(t - 2003), & t > 2003; a_4 = 0,071 \pm 0,002, a_5 = 0,048 \pm 0,001. \end{cases} \quad (8)$$

В первом приближении при построении прогнозов можно задать параметры модели $\sigma(t), \delta, \rho(t)$ их средними значениями и указанными линиями трендов. Нужно только учитывать, что в соответствии с балансом (4) и обозначениями (5) для положительности потребления необходимо выполнение условия $1 - \delta + \rho(t) - \sigma(t) > 0$. По статистическим данным найдены линии тренда для числа занятых в экономике области $L(t)$, а также для индексов относительных цен на экспорт, импорт и инвестиции $r(t), s(t), p(t)$ как среднеквадратическое отклонение расчетных и статистических значений:

$$L(t) = 743,3 \cdot (a_6 + (1 - a_6)(t - 1999)^2 \exp(-a_7(t - 2000))), \quad (9)$$

$$r(t) = a_8 + (1 - a_8)(t - 1999)^2 \exp(-a_9(t - 2000)), \quad (10)$$

$$s(t) = a_{10} + (1 - a_{11})(t - 1999)^2 \exp(-a_{12}(t - 2000)), \quad (11)$$

$$p(t) = a_{12} + (1 - a_{12})(t - 1999)^2 \exp(-a_{13}(t - 2000)), \quad (12)$$

где $a_6 = 1,0197 \pm 0,0006$, $a_7 = 0,536 \pm 0,002$, $a_8 = 1,0488 \pm 0,0005$, $a_9 = 0,526 \pm 0,002$, $a_{10} = 1,0047 \pm 0,0003$, $a_{11} = 0,096 \pm 0,002$, $a_{12} = 0,8277 \pm 0,0004$, $a_{13} = 1,320 \pm 0,002$. В (9)–(12) соблюдаются условия нормировки: $L(t)/143,3 = r(t) = s(t) = p(t) = 1$ при $t = 2000$. Все статистические значения находятся в доверительных интервалах найденных теоретических значений, что говорит об адекватности найденных параметров.

Для идентификации модели (нахождения значений параметров) нужно сравнить по какой-либо мере близости расчетные выходные временные ряды переменных модели с доступными статистическими временными рядами 2000–2007 г.г. Для однозначного выбора оптимального вектора параметров модели $\vec{u} = (a, b, \mu, Y_0/K_0)$, заданных верхними и нижними границами, $u_i \in (u_i^-, u_i^+)$, $i = 1, \dots, 4$, в качестве меры близости будем использовать близость к единице определенной ниже свертки коэффициентов расхождения Тейла и коэффициентов корреляции Пирсона сравниваемых статистических и расчетных временных рядов макропоказателей модели. В формальной записи требуется найти максимум функционала $F(\vec{u})$, который представляет собой среднегеометрическое всех критериев близости и корреляции

$$F(\vec{u}) = \sqrt[2m]{\prod_{j=1}^m (1 - T_j(\vec{u})) U_j(\vec{u})}, \quad (13)$$

где m – число макропоказателей; j – номер макропоказателя, $j = 1, \dots, m$, $U_j(\vec{u}) = R(X_j, Y_j)$ – коэффициент корреляции Пирсона расчетных $X_j = X_j(\vec{u})$ и статистических Y_j временных рядов для j -го макропоказателя, а $T_j(\vec{u})$ – коэффициент расхождения Тейла для этих временных рядов j -го макропоказателя, используемый вместо среднеквадратического отклонения для оценки расхождения растущих временных рядов в экономике [3],

$$T_j(\vec{u}) = \sqrt{\frac{\sum_{t=2000}^{2007} (X_j(t) - Y_j(t))^2}{\sum_{t=2000}^{2007} X_j^2(t) + \sum_{t=2000}^{2007} Y_j^2(t)}}.$$

Для упрощения работы с моделью перейдем в выражениях для труда L_t , капитала K_t и выпуска Y_t к относительным величинам: l_t, k_t, y_t , соответственно.

$$l_t = L_t/L_0, \quad k_t = K_t/K_0, \quad y_t = Y_t/Y_0. \quad (14)$$

Начальные значения всех этих величин равны единице: $l_0 = k_0 = y_0 = 1$. Поскольку временной ряд для эффективного капитала, вовлеченного в процесс воспроизводства, мы считаем неизвестным, за счет его изменения мы можем добиться нужного роста выпуска, и поэтому для описания роста ВВП достаточно рассмотреть однородную производственную функцию. Тогда (1) и (14) дают

$$y_t = [a l_t^{-b} + (1-a) k_t^{-b}]^{-1/b}, \quad (15)$$

$$k_{t+1} = (1-\mu)k_t + \alpha \sigma_t y_t / p_t, \quad k_0 = 1, \quad (16)$$

где введено обозначение

$$\alpha = Y_0/K_0. \quad (17)$$

Результаты моделирования

Основная задача данной работы – найти временной ряд для капитала, который наилучшим образом способствует близости временных рядов для макропоказателей, рассчитанных по модели, с их статистическими аналогами. Фиксируем начальные значения для труда и выпуска, $L_0 = 734,3$, $Y_0 = 30000$, величины δ , ρ_t , σ_t задаем средними значениями из соотношений (6)–(8), труд – выражением (9), относительные цены – выражениями (10)–(12). При каждом заданном наборе параметров $\vec{u} = (a, b, \mu, \alpha)$ с

помощью выражений (14) и (17) найдем искомые временные ряды макропоказателей Y_t, I_t, Q_t, J_t, E_t . Для сравнения близости расчетных временных рядов указанных макропоказателей с их статистическими аналогами вычисляются критерии корреляции и близости (для выпуска, потребления, инвестиций, импорта и экспорта Y_t, I_t, Q_t, J_t, E_t) за период 2000–2007 г.г. и свертка критериев (13).

Возможный интервал изменения оцениваемых параметров: $a \in (0, 1)$, $b \in (-1, 2)$, $\mu \in (-0, 2; 0, 2)$, $\alpha \in (0, 3)$. Для поиска параметров с помощью параллельных вычислений надо взять сетку по каждому из интервалов, организовать перебор всех возможных сочетаний, распараллелить этот перебор на доступное число процессоров; на каждом из процессоров отбросить варианты, в которых коэффициенты корреляции и близости меньше 0,5; среди оставшихся вариантов выбрать вариант с наибольшим совокупным критерием $F(\vec{u})$, отправить его номер процессору-мастеру, вычислить самый большой критерий среди полученных от процессоров-рабочих и для него рассчитать все временные ряды; нарисовать графики, сравнивающие расчет со статистикой.

Время расчета на 24 ядрах кластера составило приблизительно 3 минуты, интервалы сетки изменяемых параметров составляли 0,01. На каждом процессе вычислялись векторы валового выпуска и индексы близости. Вариант с лучшим значением коэффициента близости отправлялся главному процессу, который выбирает лучший из лучших вариантов. Результаты – лучший коэффициент близости, параметры модели и время счета – выводятся главным процессором.

Численные результаты идентификации следующие: $a = 0,948 \pm 0,001$, $b = -0,952 \pm 0,002$, $\mu = -0,175 \pm 0,003$, $\alpha = 0,120 \pm 0,002$. Тогда $K_0 = Y_0/\alpha = 318000 \pm 5300$ млн. руб. 2000 г. Отрицательное значение параметра μ означает, что эффективный капитал прирастает намного быстрее, чем это обеспечивают инвестиции. Значит, в производство вовлекается старый капитал советского времени. Но объем его не безграничен. Можно оценить время его исчерпания. Допустим, что максимальный объем старого капитала, который может быть вовлечен без инвестиций, в четыре раза превышает объем эффективного капитала в 2000 г. Тогда время T исчерпания старого капитала в годах можно оценить следующим образом:

$$T = \frac{1}{|\mu|} \ln \left(\frac{K_T}{K_0} \right) = \frac{\ln(4,0 \pm 0,1)}{(0,175 \pm 0,003)} = 7,98 \pm 0,28 .$$

По этой оценке в 2008 г. должен быть исчерпан объем вовлекаемого старого капитала. В базовом варианте прогноза считаем, что все параметры принимают значения, определенные при идентификации. Относительные индексы цен меняются в силу оценок (7)–(9). Предполагаем, что труд после 2007 г. прирастать не будет (так как, в силу демографических проблем, скорее всего, он не будет расти), $\gamma = 0$ после 2007 г. Считая, что вовлечение старых мощностей завершается в 2008 г., рассчитаем значение показателей до 2020 года. В результате расчета получим оценку динамики капитала и выпуска для базового пессимистического сценария расчета.

Был рассмотрен и оптимистический вариант, который учитывает происходящие в последнее время изменения в экономической политике. Предположим, что эти изменения начались в 2000 г. и рост экономики идет за счет научно-технического прогресса (НТП), имитации лучших зарубежных образцов, осуществления собственных инноваций. Таким образом, предполагаем существование возрастающей отдачи на используемые производственные факторы. Формально это выражается тем, что производственная функция будет однородной степени $c > 1$.

$$Y(t) = Y_0 \left[a(L/L_0)^{-b} + (1-a)(K/K_0)^{-b} \right]^{-c/b} . \quad (18)$$

Введение нового параметра приводит к тому, что темп амортизации капитала надо определять из каких-то внешних соображений. Определим темп амортизации из условия, что объем инвестиций в 2000 г. был равен объему амортизации капитала: $\mu = \alpha\sigma_0 = J_0/K_0$. Считаем, что, несмотря на демографические проблемы, численность людей, занятых в экономике, в пересчете на простой труд продолжает расти за счет повышения в экономике, основанной на НТП, уровня используемого в производстве человеческого капитала. По-прежнему считаем, что индексы относительных цен меняются по заданным функциям (таким же, как и в базовом сценарии).

Результаты идентификации параметров в оптимистическом варианте: $a = 0,709 \pm 0,001$, $b = 0,0438 \pm 0,0009$, $\mu = 0,200 \pm 0,006$, $\alpha = 1,9920 \pm 0,0003$, $\gamma = 3,0 \pm 0,1$, $K_0 = 15100 \pm 450$ млн.руб. Оценка начального значения капитала получается приблизительно в двадцать раз меньше, чем в базовом варианте. Это указывает на то, что пока реализуется пессимистический вариант.

Заключение

Получена оценка эффективного капитала, реально используемого в процессе воспроизводства Кировской области. Рассчитаны два из большого числа возможных сценариев развития экономики области – пессимистический и инновационный. Хотя предложенная модель и не позволяет дать конкретный прогноз развития экономики, но позволяет сделать предположение о благоприятном развитии региона и дать возможность правильно оценить сложившуюся в регионе ситуацию лицам, принимающим решения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты №№ 08-01-00377, 09-01-90201-Монг_а, 07-01-00563, 07-01-12032-офи), гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (проект № НШ-2982.2008.1), ПФИ ОМН РАН № 2, ПФИ Президиума РАН П-2

Литература

1. Оленев Н.Н. Основы параллельного программирования в системе MPI. – М.: ВЦ РАН, 2005. – 80 с.
2. Козлицкая А.В., Кошечев А.В., Фетинина А.И. Технология использования MPI приложений в алгоритмах параллельных вычислений // Экономические аспекты развития России: микро- и макроуровни. Сб. мат. межвуз. студенческой научно-практич. конф. / Под ред. Л.А. Суворовой. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2008. – С. 125–131.
3. Оленев Н.Н., Печенкин Р.В., Чернецов А.М. Параллельное программирование в MATLAB и его приложения. – М.: ВЦ РАН, 2007. – 120 с.
4. Оленев Н.Н., Фетинина А.И. Идентификация простейшей динамической модели экономики Кировской области // Математическое моделирование развивающейся экономики, экологии и биотехнологий Сб. тр. III Всерос. научн. конф. ЭКОМОД-2008. – Киров: ВятГУ, 2008.
5. Оленев Н.Н., Фетинина А.И. Параллельные вычисления в идентификации динамической модели экономики Вятского региона // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2009). Тр. межд. науч. конф. (Нижний Новгород, 30 марта – 3 апреля 2009 г.). – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2009. – С. 257–268.

Оленев Николай Николаевич

– Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН, кандидат физ.-мат. наук, доцент, nolenev@yahoo.com

Фетинина Анна Игоревна

– Вятский государственный университет, аспирант, konfetkina17@mail.ru

УДК 623.483:338

К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ПРОДУКЦИИ ПРЕДПРИЯТИЙ ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА РОССИИ

А.Л. Сабина, М.Д. Терехова

Рассмотрена возможность использования регрессионного анализа для оценки потенциальной конкурентоспособности продукции предприятий оборонно-промышленного комплекса России. Получены зависимости для определения весовых коэффициентов при оценке параметрических индексов технического уровня и экономических показателей.

Ключевые слова: регрессионный анализ, потенциальная конкурентоспособность продукции, весовой коэффициент, параметрический индекс.

Введение

Подход к проблеме развития оборонно-промышленного комплекса (ОПК) в условиях рыночной экономики в последнее время претерпел существенные изменения. Если ранее он базировался на концепции возможности успешного конверсионного развития предприятий ОПК, то сейчас уже окончательно стало ясно, что конверсия не только не решает проблемы ОПК, но может привести к потере производственно-технического потенциала ОПК. Происходившие одновременно с конверсией производства сокращение и утилизация уже имеющихся вооружений и военной техники, которые также происходили в системе оборонно-промышленного комплекса, привели к исчезновению заказов на комплектующие и запасные части к утилизируемой технике, что также негативно отразилось на работе предприятий ОПК. Кроме того, предприятия оборонно-промышленного комплекса могут конверсировать свое производство только в условиях дополнительных инвестиций, эффективность которых в ряде случаев сомнительна. Сложность конверсии связана также как с наличием значительного количества специализированного и достаточно современного оборудования, ориентированного на производство вооружений и военной техники, так и с достаточно узкой подготовкой кадров на подобных производствах, которые, обладая глубокими знаниями и опытом производства вооружений и военной техники, не обладают опытом производства конверсионной продукции. Поэтому актуальным является поиск других путей адаптации предприятий военной промышленности России к рыночным условиям.

Одним из таких путей является выход российских предприятий ОПК на мировой рынок вооружений и военной техники и военно-техническое сотрудничество с другими странами. Однако для выхода на мировые рынки вооружений и военной техники необходимо как техническое, так и организационное перевооружение предприятий оборонно-промышленного комплекса, что требует соответствующих инвестиций.

Постановка задачи

Существенным фактором обеспечения устойчивого функционирования предприятий оборонно-промышленного комплекса является сохранение их кадрового состава, обладающего специфическими знаниями и навыками и являющегося весьма ценным человеческим капиталом. В значительной степени именно подобный человеческий капитал является гарантом возможности выпуска современной продукции, конкурентоспособной на мировом рынке вооружений и военной техники. Утеря этого капитала, причиной которой может быть, прежде всего, недостаточный уровень заработной платы, связанный с недостаточным финансированием данной сферы, является решающим шагом в процессе потери организационно-экономической устойчивости предприятий оборонно-промышленного

комплекса. Важна также и роль интеллектуального продукта военного и двойного назначения, создаваемого на предприятиях оборонно-промышленного комплекса, в обеспечении национальной безопасности России. Естественно, что подобный интеллектуальный продукт не может быть создан без соответствующих кадровых ресурсов.

В то же время при выходе на мировой рынок актуальными становятся проблемы, связанные с созданием вооружения и военной техники, конкурентоспособной на этом рынке. С другой стороны, оценка эффективности деятельности предприятия также характеризуется уровнем конкурентоспособности продукции. Проблема обеспечения конкурентоспособности продукции гражданского назначения хорошо изучена, существует целый набор подходов к ее решению. Вопросы определения и управления уровнем конкурентоспособности продукции военного назначения требуют разработки особого подхода, обусловленного особенностями ее производства и использования.

Разработка подхода к оценке потенциальной конкурентоспособности

Ранее [1–4] был развит подход к оценке потенциальной конкурентоспособности вооружений и военной техники (ВиВТ), основанный на том, что степень влияния отдельных параметров изделия на его конкурентоспособность в целом оценивается экспертным путем, а сама конкурентоспособность определяется соотношением индексов конкурентоспособности по техническим и экономическим параметрам. Значения индексов зависят от соотношения технических и экономических характеристик изделия и товара-образца и отражают результаты сопоставления реально существующих продуктов, предлагаемых рынку.

Технический уровень может быть определен с помощью наиболее значимых показателей, выражаемых объективными числовыми значениями, баллами экспертной оценки либо качественными или альтернативными характеристиками. Каждый из показателей t_j , ($j=1, \dots, J$) сравнивают с показателями изделия-аналога t_{j0} . Получают ряд относительных параметрических индексов $y_j = t_j / t_{j0}$ (при условии, что увеличение t ведет к улучшению потребительских свойств) или $y_j = t_{j0} / t_j$ (при условии, что увеличение t ведет к ухудшению потребительских свойств). Значимость параметров и их приоритетность определяется, исходя из требований потребителей, методом экспертных оценок и отражается весовым коэффициентом. Тогда интегральный показатель технического уровня F_T рассчитывается как

$$F_T = \sum_{j=1}^J a_j \cdot y_j, \quad (1)$$

где a_j – весовой коэффициент j -го показателя технического уровня, J – число анализируемых показателей технического уровня. По аналогичной схеме определяется ценовая привлекательность образца ВиВТ. При этом сравнивают составляющие цены потребления: затраты на приобретение (продажная цена), расходы на транспортировку до места использования, затраты на монтаж и наладку, затраты на обучение персонала, затраты на техническое обслуживание эксплуатации, затраты на послегарантийное обслуживание и покупку запчастей, затраты на утилизацию изделия после выработки ресурса. Ценовая привлекательность оценивается сравнением экономических показателей c_l ($l=1, \dots, L$) с показателями изделия-аналога c_{l0} исчислением частных экономических параметрических индексов $l_l = c_l / c_{l0}$. Сводный индекс конкурентоспособности по экономическим (ценовым) параметрам F_3 определяется по формуле

$$F_{\text{э}} = \sum_{l=1}^L b_l l_l \quad (2)$$

где b_l – весовой коэффициент l -го параметра, L – число анализируемых параметров.

Сводные индексы конкурентоспособности по техническому уровню и ценовой привлекательности позволяют вычислять интегральный показатель конкурентоспособности выпускаемого изделия по отношению к базовому аналогу

$$F_{\text{и}} = F_{\text{т}} / F_{\text{э}}. \quad (3)$$

Если $F_{\text{и}} > 1$, то предлагаемое изделие превосходит аналог по конкурентоспособности, если $F_{\text{и}} < 1$ – уступает ему. Однако при определении показателя конкурентоспособности выпускаемого изделия возникает проблема оценки весовых коэффициентов a_j и b_l .

Решение проблемы оценки весовых коэффициентов при расчете индексов конкурентоспособности ВиВТ

Как уже отмечалось ранее, в общем случае коэффициенты a_j и b_l могут быть определены экспертным путем, однако при наличии сведений об объемах продаж подобных изделий на мировом рынке ВиВТ можно предложить методы, основанные на регрессионном анализе. Естественно, что при этом необходимо использовать относительные значения переменных.

Пусть имеется некоторое множество аналогичных изделий ВиВТ, характеризующихся J показателями технического уровня и L экономическими показателями. Тогда общее число показателей $N = J + L$. Для рассматриваемого множества изделий известны объемы продаж на мировом рынке ВиВТ – $O_1, O_2, \dots, O_m, \dots, O_M$. Одно из изделий должно быть выбрано в качестве изделия-аналога с объемом продаж O_{m0} . Тогда, переходя к относительным величинам, получим:

$$o_1 = \frac{O_1}{O_{m0}}, o_2 = \frac{O_2}{O_{m0}}, \dots, o_m = \frac{O_m}{O_{m0}}, \dots, o_M = \frac{O_M}{O_{m0}}. \quad (4)$$

Для каждого из m изделий можно определить относительные параметрические индексы технического уровня y_{jm} и частные экономические параметрические индексы l_{lm} по приведенным выше зависимостям. Тогда обобщенное множество параметрических индексов для каждого из изделий будет иметь вид

$$x_{1m} = y_{1m}, x_{2m} = y_{2m}, \dots, x_{jm} = y_{jm}, \dots, x_{(j+1)m} = l_{1m}, x_{(j+2)m} = l_{2m}, \dots, x_{Nm} = l_{Lm}. \quad (5)$$

Будем оценивать связь объема продаж с параметрическими индексами уравнением регрессии

$$o = c_0 + c_1 x_{1m} + c_2 x_{2m} + \dots + c_N x_{Nm}. \quad (6)$$

Коэффициенты уравнения регрессии определяются путем решения матричного уравнения

$$A \times X = B, \quad (7)$$

где X – матрица коэффициентов уравнения регрессии, B – матрица свободных членов, A – матрица коэффициентов при неизвестных:

$$X = \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \dots \\ c_N \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} \sum_{m=1}^M O_m \\ \sum_{m=1}^M O_m x_{m1} \\ \dots \\ \sum_{m=1}^M O_m x_{mN} \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} M & \sum_{m=1}^M x_{m1} & \sum_{m=1}^M x_{mN} & \dots & \sum_{m=1}^M x_{mN} \\ \sum_{m=1}^M x_{m1} & \sum_{m=1}^M x_{m1}^2 & \sum_{m=1}^M x_{m2} x_{m1} & \dots & \sum_{m=1}^M x_{mN} x_{m1} \\ \sum_{m=1}^M x_{m2} & \sum_{m=1}^M x_{m1} x_{m2} & \sum_{m=1}^M x_{m2}^2 & \dots & \sum_{m=1}^M x_{mN} x_{m2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{m=1}^M x_{mN} & \sum_{m=1}^M x_{m1} x_{mN} & \sum_{m=1}^M x_{m2} x_{mN} & \dots & \sum_{m=1}^M x_{mN}^2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Учитывая, что

$$\sum_{j=1}^J a_j = \sum_{l=1}^L b_l = 1, \quad (9)$$

можно оценить весовые коэффициенты в выражениях (1) и (2) на основе значений коэффициентов уравнения регрессии.

$$a_j = \frac{c_j}{\sum_{m=1}^J c_m}, \quad b_l = \frac{c_{J+l}}{\sum_{m=J+1}^{N=J+L} c_m}. \quad (10)$$

Рассмотренная методика оценки значений весовых коэффициентов при определении потенциальной конкурентоспособности будет давать хорошие результаты при наличии достаточного объема сведений о продажах на мировом рынке ВиВТ аналогичных изделий. Однако в ряде случаев информация о подобных продажах может быть засекречена или не отличается объективностью. В то же время существует практика рассекречивания сделок через несколько лет после их совершения. Это может позволить провести анализ изменения значений коэффициентов a_j и b_l по годам наблюдений. При этом возможны различные варианты их изменения, основные из которых представлены на рисунке.

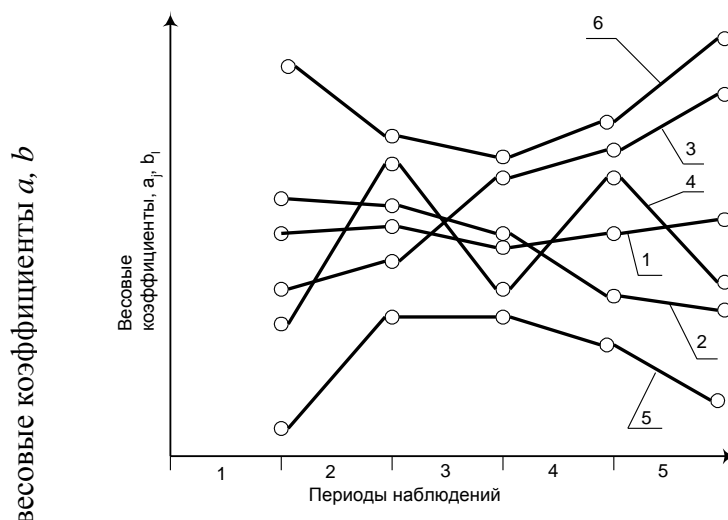


Рисунок. Варианты изменения во времени весовых коэффициентов параметрических индексов потенциальной конкурентоспособности: 1 – постоянство, 2 – возрастание, 3 – убывание, 4 – колебания, 5 – с экстремумом (максимумом), 6 – с экстремумом (минимумом)

Постоянство весового коэффициента для выбранного параметрического индекса свидетельствует о стабильности предпочтений покупателей по соответствующему техническому или экономическому параметру. Возрастание свидетельствует о повышении заинтересованности рынка и требует учета данного параметра при производстве соответствующей продукции. Поскольку сумма всех весовых коэффициентов принята постоянной, то одновременно с возрастанием одних весовых коэффициентов должно наблюдаться снижение других. Подобное устойчивое снижение свидетельствует о смене приоритетов покупателей при выборе продукции и также должно учитываться при производстве.

Возможен также вариант, когда наблюдаются колебания того или иного весового коэффициента. При этом соответствующие этим коэффициентам параметры должны поддерживаться на некотором стабильном уровне, так как трудно судить о направлении их влияния. Варианты с наличием экстремума также являются парными: если у одного из весовых коэффициентов имеется максимум, то у какого-либо другого будет наблюдаться минимум. В этом случае требуется глубокий анализ причин подобного изменения предпочтений покупателей с последующей адекватной реакцией производства и проектирования.

Заключение

В рамках решения поставленной задачи был разработан подход к оценке потенциальной конкурентоспособности ВиВТ, основанный на использовании индексов конкурентоспособности по техническим и экономическим параметрам. Возникающую при этом проблему оценки весовых коэффициентов параметрических индексов потенциальной конкурентоспособности предлагается решать с использованием методов регрессионного анализа. Анализ изменений полученных значений весовых коэффициентов во времени позволяет сделать вывод о существующих тенденциях на рынке ВиВТ.

Таким образом, регрессионный анализ и исследование изменения весовых во времени позволяют обнаружить тенденции к изменению предпочтений соответствующего рынка и своевременно ориентировать на них производство ВиВТ.

Литература

1. Сабина А.Л. Пути повышения конкурентоспособности вооружений и военной техники, производимых в России // Экономика. Управление. Финансы / Материалы междунар. научн.-практ. конф. Часть 1. – Тула, 2002. – С. 208–211.
2. Сабина А.Л. Механизмы формирования распределительных отношений в оборонно-промышленном комплексе России // Финансы и кредит. – 2003. – № 11. – С. 40–43.
3. Сабина А.Л. Оптимизация распределительных отношений в оборонных холдингах на этапе планирования производства продукции военного назначения // Финансы и кредит. – 2003. – № 14. – С. 13–17.
4. Сабина А.Л. Формирование потенциальной конкурентоспособности вооружений и военной техники // Известия ТулГУ. Экономика и управление. – Тула: ТулГУ, 2003. – С. 89–99.

Сабина Анна Львовна

– Тульский государственный университет, кандидат технических наук, докторант, andrej-malikov@yandex.ru

Терехова Марина Дмитриевна

– Тульский государственный университет, аспирант, andrej-malikov@yandex.ru

OPTICAL AND OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS. OPTICAL TECHNOLOGIES

OPTICAL MEASURING IN NONINERTIAL FRAMES OF REFERENCE

V. Bogatyreva

New methods of measuring such parameters of accelerated motion as angular velocity, angular and linear acceleration are considered. Measuring principles are based on the fact that there are inertial forces influencing the components of an optical-mechanical devices in noninertial frames of reference (rotating or under linear acceleration) and it leads to the components displacement and a changing of beam track relative to initial track. These changes are either the sources of noise or can be used to extract useful information about parameters of device accelerate movement. An instrument for measuring angular speed was suggested in the article.

Keywords: inertial frames of reference, angular velocity, angular acceleration, linear acceleration.

Valeria Bogatyreva – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, carlo.01@mail.ru, carlo02@yandex.ru

THE CLOSED SIGNAL PROCESSING SCHEME IN THE FIBER-OPTIC CURRENT SENSOR

I. Meshkovskiy, V. Strigalev, S. Tarakanov

The way of accuracy increasing of the fiber optic current sensor in wide currents range is considered in this article by the closed signal processing scheme. The way of the modulator control operation by the second feedback addition in the processing scheme is also considered.

Keywords: fiber-optic current sensor, fiber interferential scheme, the double-refraction modulator, closed signal processing scheme.

Igor Meshkovskiy – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department Head, Ph.D., Professor, igorkm@spb.runnet.ru

Vladimir Strigalev – Bonch-Bruевич St. Petersburg State University of Telecommunications, Department Head, Ph.D, Associate professor, vstrglv@mail.ru

Sergey Tarakanov – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Engineer, netforever@mail.ru

OPTICAL-ELECTRONIC VELOCIMETER WITH INVARIANT NOISE IMMUNITY CHARACTERISTICS

V. Artemiev, N. Belov, V. Korotaev, A. Smirnov, A. Yaskov

The original approach to realization of an invariant optical-electronic measuring instrument of optical non-uniform surfaces speed is considered. Distinctive feature of the considered approach is the use of a two-channel method of the image analysis with the two-way filter application. The chosen procedure of signal processing in an electronic path allows to carry out adaptive correction of signals and to exclude signal influence in one of the channels on target parameters of the measuring device.

Keywords: velocimeter, optical non-uniform surfaces, noise immunity, invariant characteristics.

Vasily Artemiev - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, Ph.D, Associate professor, technocon@imail.ru

Nikolay Belov - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior scientific researcher, technocon@imail.ru

Valeriy Korotaev - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department Head, Ph.D., Professor, korotaev@grv.ifmo.ru

Andrey Smirnov – Engineering Center “Tekhnokon”, Ltd., Deputy Director, Ph.D. technocon@imail.ru

Andrey Yaskov - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, technocon@imail.ru

SPECTRAL PROPERTIES INVESTIGATION OF DYES AND SUPERFICIALLY PAINTED POLYMERIC LENSES

E. Prunenکو

The article is dedicated to research of the spectral qualities of disperse dyes for surface dyeing of the polymer glass lenses and dyed lenses. The spectral characteristics of the seven dye samples with different colors and their refractive indices at room temperature and temperature of dyeing are given. The relation between the dye color and the color of dyed lenses of different color intensity is established.

Keywords: dispersible dyes, superficial coloration, spectral characteristics, refractive index.

Elena Prunenکو - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, prunenکو@pochta.ru

LASER TECHNOLOGIES

PECULIARITIES OF CONTINUOUS WAVE GENERATION OF Er:YLF-LASER WITH SELECTIVE PUMPING ON TERMINATE ($^4I_{13/2}$) AND INITIAL ($^4I_{11/2}$) LASER LEVELS

D. Sachkov

The current work presents the results of theoretical study of spectral and energy characteristics of Er:YLF-laser in dependence on up-conversion parameters of $^4I_{11/2}$ and $^4I_{13/2}$ levels and the pumping scheme. The theoretical model developed in this work can be used for other erbium crystals.

Keywords: erbium, laser, selective pumping, continuous wave (CW) generation.

Dmitry Sachkov – S.-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, dsachkov@gmail.com

COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES ANALYSIS OF FAILURES ACCUMULATION INFLUENCE OF COMMUNICATION TOOLS AT DECLINE OF REDUNDANT COMPUTER OPERATING SYSTEMS COMMUNICATION POSSIBILITIES

V. Bogatyrev, E. Kotelnikova

Accumulation influence of refusals of network adapters and highways (switchboards) on decrease in communication possibilities of typical structures of computer systems with reservation of communication means is analyzed; negative influence of refusals of network adapters on loading equilibration of the communication system, reducing its productivity, is shown.

Keywords: fault tolerance, degradation, communication subsystem, average time of query residence.

Vladimir Bogatyrev - St. Petersburg State University of Service and Economy, Professor, D.Sc.,

Vladimir.bogatyrev@gmail.com

Elena Kotelnikova – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, elka842@yandex.ru

NUMERICAL SIMULATION OF TRANSIENT PROCESSES IN COMPLEX NETWORKS EVOLVING BY GENETIC ALGORITHMS

A. Koronovskiy, A. Kositsin, O. Moskalenko, A. Khramov

Investigation results of cooperative phenomena in complex networks have been presented. Genetic algorithm has been developed for simulation of the evolution processes in complex networks. Transient processes taking place during the evolution have been analyzed. Several regularities appearing in the process of the network optimization have been found.

Keywords: complex networks, genetic algorithm, eigenvector centrality, transient process, intermittency.

Alexey Koronovskiy – Saratov State University named after N.G. Tchernyshevsky, Professor, D.Sc., Associate Professor, alkor@nonlin.sgu.ru

Andrey Kositsin – Saratov State University named after N.G. Tchernyshevsky, Student, kositzyn@gmail.com

Olga Moskalenko - Saratov State University named after N.G. Tchernyshevsky, Assistant Lecturer, senior scientific researcher, Ph.D., o.i.moskalenko@gmail.com, moskalenko@nonlin.sgu.ru, lulu.mos@gmail.com

Alexander Khramov – Saratov State University named after N.G. Tchernyshevsky, Professor, D.Sc., Professor, aeh@nonlin.sgu.ru

MODERN TECHNOLOGIES OF AUDIO SIGNALS COMPRESSION

E. Piunovskiy, A. Tropchenko

Possibilities and advantages of the audio data compression with the application of wavelet-transformations are considered in the article. Problems of the existing sound compression methods are revealed, ways of wavelets introduction into algorithms of compression are analyzed, the scheme of compression of the audio data on the basis of adaptive orthogonal transformations is offered.

Keywords: audio compression, codec, coding, wavelet transform, MPEG.

Eugeny Piunovskiy – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, evgpiun@gmail.com

Andrey Tropchenko – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate Professor, Ph.D., zayka_98rus@mail.ru

HALF FORMALIZED MODELS PACKAGE OF A MOBILE TELEMEDICAL COMPLEX

S. Goldshtein, E. Malysheva

The article is devoted to creation of a half formalized models package of a mobile telemedical complex in the form of conceptual, structural and algorithmic models. Their description is presented in the form “How it should be”. The purpose of modeling is consulting support at the solution of problem situations during the organization of medical aid.

Keywords: half formalized models, mobile telemedical complex.

Sergey Goldstein – Yeltsin Ural State Technical University, Department Head, D. Sc., Professor, vtisl@dpt.ustu.ru

Ekaterina Malysheva – Yeltsin Ural State Technical University, Postgraduate, katyona@bk.ru

MECHANICS AND MECHATRONICS
AN ENERGY METHOD FOR PARAMETRICAL IDENTIFICATION
OF OBJECT INERTIA TENSORS

V. Melnikov

A new method for parametrical identification of an inertia tensor matrix for solid bodies on a semi-program precession is offered. A non-uniform spherical biaxial motion with linear holonomic connection between two angles of rotation and double-turn corner of own rotation is used. It contains a stage of the slowed down movement and a stage of the return symmetric accelerated motion, where one stage can be chosen as non program, and another one- under the program based on the first stage. The inertia moments of a body relative to five positions of an instant axis are defined. The sixth one is defined relative to rotation about a fixed axis.

Keywords: inertia tensor, parametrical identification, reverse-symmetric spherical motion, semi-program precession.

Vitaly Melnikov – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department Head, Ph.D., Associate professor, melnikov@mail.ifmo.ru

LANCHESTER MODEL AND DAMPED
HELICAL ANISOTROPY RODS DYNAMICS

P. Sergushin

The model of Lanchester damped dynamic system is considered, Simulink model scheme is composed; the response on typical inputs is analyzed. Alternative application is proposed.

Keywords: dynamics, vibrations, Lanchester damper, helical anisotropy.

Pavel Sergushin - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, pavel.sergushin@gmail.com

THE DEVELOPMENT OF SMALL ANGULAR FLUCTUATIONS OSCILLATOR

M. Buslaeva

Oscillator is a physical oscillating system. This article presents the parameters design and calculation results of the small angular fluctuations oscillator. The types of elastic suspensions for moving parts of the system are considered during research, in this case – a steel disc; recommendations on their choice and calculation are given, and also the choice and the basic computational relations for oscillator electric device development are presented. The described oscillator development was conducted as a part of research work on modulation flame detector design – high-speed flame detection device.

Keywords: small angular displacements, mechanical resonance, elastic suspension, electromagnetic device.

Margarita Buslaeva м Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev, Postgraduate, margo_busl@mail.ru.

THERMAL PHYSICS AND THEORETICAL HEAT ENGINEERING
INFORMATION RELIABILITY AND CONSISTENCY SUPPORT OF THERMODYNAMIC
FUNCTIONS AND DATABASES

A. Slobodov, A. Sochagin, E. Kacher, D. Kremnev, M. Radin

The approach to the description of substances thermodynamic functions by means of orthogonal representation is suggested. The corresponding method is developed and thermodynamic description of isobar heat capacities temperature dependence is constructed. Its higher efficiency is shown in comparison with traditional approaches - both from formal positions of the mathematical and thermodynamic description and from the point of view of received results reliability. The method for coordinated description of low- and high-temperature thermodynamic data is also suggested (for heat capacity, enthalpy, etc.). The combination of these approaches allows receiving the most authentic description of substances thermodynamic properties. The thermodynamic database for a wide range of substances, realized in a corresponding software-information complex, is constructed.

Keywords: thermodynamic functions, information, modeling, calculation, database, heat capacity, orthogonal representation, coordination of data, software complex.

Alexander Slobodov - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., aslob@ton.net.ru

Alexander Sochagin м St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Postgraduate, striker112@list.ru

Ekaterina Kacher - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, kacherekaterina@list.ru

Dmitry Kremnev – St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Postgraduate, spbscout@narod.ru

Mikhail Radin – St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University), senior lecturer, Ph.D., chem_misha@mail.ru

POWER AUDIT OF COTTAGES AND OTHER LOW BUILDING OBJECTS BY THERMAL IMAGING CONTROL METHOD AND CONTACT MEASUREMENTS OF THERMAL STREAMS

A. Kyamyarya, N. Serebryannikova, A. Zalesskaya

Recently the country house building has wide distribution because of the city infrastructure expansion and growth of country real estate building. Questions of energy saving and audit of a private sector of low building in the conditions of constant rising of prices for energy carriers are the most important questions. Modern methods of building structures research concerning conformity of their thermal physical properties to normative values are considered in this article. Heat-shielding properties estimation method of low building walling on the basis of thermal imaging inspections as express method for revealing the latent defects of a thermal protection is offered.

Keywords: walling, power inputs, energy-saving, thermal imaging inspection, thermogram, thermal protection, heat engineering indicators.

Alexander Kyamyarya – Investing and Building Financial Industrial Group, Public Corporation “ROSSTRO”, Head of physical section, tv_pkti@pochta

Natalya Serebryannikova – Investing and Building Financial Industrial Group, Public Corporation “ROSSTRO”, engineer, tv_pkti@pochta.ru

Anastasiya Zalesskaya – Investing and Building Financial Industrial Group, Public Corporation “ROSSTRO”, engineer, tv_pkti@pochta.ru

COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS

TETRAHEDRAL AND SURFACE TRIANGULAR MESH GENERATION TECHNIQUES

A. Danilov

A brief review of geometry definition methods and non-structured tetrahedral meshes construction is represented. Several techniques for tetrahedral and surface mesh generation are discussed. Four different approaches are proposed for surface mesh generation: analytical boundary parameterization, interface with CAD systems, surface mesh refinement, and constructive solid geometry. A combination of two techniques is proposed for volume meshing.

Keywords: tetrahedral meshes, surface meshes, CAD, constructive solid geometry, Delaunay triangulation, advancing front technique.

Alexander Danilov – Establishment of the Russian Academy of Sciences Institute of Numerical Mathematics RAS, Postgraduate, a.a.danilov@gmail.com

DESIGN FLOWS IN CAD “SYSTEMS-ON-CHIP”

P. Kustarev, A. Klyuchev

Modern approaches of «System on chip» (SoC) designing are considered in the article. SoC is defined as a design technology, distinctive tags of this technology are noticed, defects of traditional design flows, including PLD/FPGA-flows, are indicated. The main directions of design methods and flows development for SoC are defined, the common structure of effective process of SoC-designing is considered. The common description of entire/electronic system level (ESL), its sublevels and data about applied design language and tools are given. In conclusion, SoC perspectives are estimated, the most important problems in this technology, demanding to be researched, are specified.

Keywords: executable system specification, microarchitecture, macroarchitecture, PSOC, system on chip, SOC, system level.

Pavel Kustarev – St.Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate Professor, Ph.D., kustarev@lmt.ifmo.ru

Arkady Kluchev – St.Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate Professor, Ph.D., kluchev@lmt.ifmo.ru

INFORMATION SECURITY METHODS AND SYSTEMS

INFORMATION SYSTEMS SECURITY COVERAGE BASED ON ATTACK TREE ANALYSIS

S. Arustamov, Yu. Gatchin, A. Lipatov, A. Grigorieva

Presentation of IT security enhanced model for critical systems has been made, analysis of critical IT system threats has been carried out, attack tree methodology has been reviewed and enhanced parallel automata for simulation of attack cases disclosure has been developed and investigated.

Keywords: model of information security system, control model, attack trees, enhanced parallel automata.

Sergey Arustamov – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, sergey.arustamov@gmail.com

Yuri Gatchin – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department Head, D.Sc., Professor, gatchin@mail.ifmo.ru

Alexey Lipatov – ZAO “Otkrytye Tekhnologii 98”, technical manager of information security department, alipatov@ot.ru

Anastasiya Grigorieva – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, yojik2@yandex.ru

ECONOMICS AND FINANCES. MANAGEMENT**MODELING OF KIROV REGION ECONOMY BY PARALLEL PROGRAMMING TECHNOLOGIES****N. Olenyov, A. Fetinina**

Modeling of complicated economic systems represents creation of dynamic models containing a considerable quantity of parameters. It is convenient to use parallel calculations by scanning a grid of intervals for required parameters for identification of such models. Model verification occurs on statistical time series of economic macroindexes. Adequacy of model is estimated on the basis of maximization of convolution of affinity criteria for calculated and statistical data. The parallel program for model identification is written on C++ language with the use of the message passing interface (MPI) and is realized on the Vyatka State University cluster supercomputer. On the base of identified model some scenarios of economic development for Kirov region are counted. They allow making estimation for economic situation in regional economy.

Keywords: dynamic model, developing economy, identification, parallel calculations, effective capital, gross regional product, forecast, scenario.

Nickolai Olenyov - Dorodnitsyn Computing Centre of the Russian Academy of Sciences, Senior Scientist, Ph.D., Associate professor, nolenev@yahoo.com

Anna Fetinina – Vyatka State University, Postgraduate, konfetkina17@mail.ru

**VALUATION OF POTENTIAL COMPETITIVENESS
OF THE RUSSIAN WAR INDUSTRY PRODUCTS****A. Sabinina, M. Terekhova**

The possibility of using the regressive analysis for valuation of potential competitiveness of the Russian war industry products was considered. The dependencies for coefficients of scales determination, which are used for valuating exponent indexes of technical level and economical exponents, were received.

Keywords: regression analysis, potential competitiveness of product, coefficient of scales, exponent indexes.

Anna Sabinina – Tula State University, doctoral candidate, Ph.D., Associate professor, andrej-malikov@yandex.ru

Marina Terekhova – Tula State University, Postgraduate, andrej-malikov@yandex.ru

Подписано к печати 15.12.2009 Тираж 350 экз. Заказ № 13(65)

Отпечатано в учреждении «Университетские телекоммуникации»
Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи
и массовых коммуникаций, свидетельство ПИ № ФС77-33466 от 10.10.2008 г.

Подписной индекс 47 197 по каталогу агентства Роспечать
(Газеты. Журналы)

© Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики, 2010