

Содержание

Редакционный совет:

- В. М. Кутузов*
(председатель)
М. Ю. Шестопалов
(заместитель председателя)
В. А. Мейев
(ответственный секретарь)
В. Н. Малышев
("Радиоэлектроника
и телекоммуникации")
А. В. Соломонов
("Физика твердого тела
и электроника")
М. С. Курьянов
("Информатика, управление
и компьютерные технологии")
В. В. Путов
("Автоматизация
и управление")
Г. И. Прокофьев
("Электротехника")
Ю. В. Филатов
("Приборостроение
и информационные
технологии")
В. В. Шаповалов
("Биотехнические системы
в медицине и экологии")
С. А. Степанов
("Управление качеством,
инновационный
и антикризисный менеджмент")
О. Ю. Маркова
("Гуманитарные науки")
О. Г. Вендик
("История науки,
образования и техники")
Н. В. Лысенко
("Современные технологии
в образовании")

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

- Гайворонский Д. В.* Возможности улучшения характеристик
дальномерных сигналов с меандровой модуляцией 3
Анття А., Иванов А. А. Полосовые фильтры диапазонов
СВЧ и КВЧ с электрической перестройкой 8

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА И ЭЛЕКТРОНИКА

- Агафонова Д. С.* Совершенствование волоконного датчика
искры с помощью спектрального преобразования излучения 17
Левицкий В. С., Максимов А. И., Землякова С. Ю.
Исследование каталитических материалов, полученных
методом золь-гель-технологии, в системе Si-Co-O 24

ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Абрамкин С. Е., Душин С. Е., Поляшова К. А.*
Математическая модель управляемого
теплообменного процесса в испарителе 32
Голубев И. А. Развертывание распределенной системы
интеллектуального анализа данных в облачной среде 36
Каршиев З. А. Обзор параллельных алгоритмов
построения деревьев решений 43
Холод И. И. Архитектура системы разработки алгоритмов
интеллектуального анализа распределенных данных 48
Кирьянчиков В. А., Романов А. С. Автоматизированная
генерация модульных тестов по диаграммам состояний 55
Лысенко А. А., Лячек Ю. Т., Полубасов О. Б. Автоматическое
формирование линий задержки в топологии печатного монтажа 61
Имаев Д. Х., Пошехонов Л. Б., Шевцов И. В., Шестопалов М. Ю.
Структурный анализ в задачах диагностики сложных систем 65

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

- Путов В. В., Шелудько В. Н., Путов А. В., Друян Е. В.*
Адаптивная система управления торможением
электромеханических движителей транспортных колес
с пневматическими шинами 73

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

- Гончаров В. Д., Самсонов Д. С., Грачева И. Е., Мошников В. А.,
Фискин Е. М.* Технология повышения адгезии
полимерных материалов 81

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Степанов Б. Г., Теплякова А. В.* Об излучении
водозаполненного пьезоцилиндра через торцевые апертуры
в цилиндрический волновод 89

* * *

Суров И. Л., Боронахин А. М. Инерциально-спутниковая навигационная система на микромеханических датчиках 95

**БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ
В МЕДИЦИНЕ И ЭКОЛОГИИ**

Степанов А. Б. Применение вейвлетов при очистке от шума и компрессии сигналов электроэнцефалографии 103

Кочелаев Е. А., Волчек А. О., Сидоренко В. М. Метод расчета индикатрисы флуоресценции частиц аэрозоля 110

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ

Бегун П. И., Рубашова Д. А., Щетилина О. В. Биомеханическое моделирование и информационные технологии исследования состояния структур человеческого организма 119

ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

Калинина В. В. К вопросу о позитивных и негативных аспектах процесса информатизации современного общества 126

Мамина Р. И., Пирайнен Е. В. Новации современного коммуникативного пространства 133

ИСТОРИЯ НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЯ И ТЕХНИКИ

Рогинский В. Ю. Краткий очерк научной, педагогической и общественной деятельности Коваленкова Валентина Ивановича 139

Сведения об авторах 147

Правила представления рукописей авторами 151

**ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС 45821 ПО ОБЪЕДИНЕННОМУ КАТАЛОГУ
"ПРЕССА РОССИИ". ТОМ 1 "ГАЗЕТЫ И ЖУРНАЛЫ"**

Подписка производится в любом почтовом отделении России

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (решение Президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России от 19 февраля 2010 года № 6/6)

Учредитель:

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)»
197376, Санкт-Петербург,
ул. Проф. Попова, 5
Тел.: (812) 346-44-87
Факс: (812) 346-27-58

Свидетельство о регистрации

ПИ № ФС2-8390
от 04.12.2006 г. выдано
Управлением Федеральной службы по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия по Северо-Западному федеральному округу

* * *

Редакторы:

Э. К. Долгатов, Н. В. Лукина,
Т. А. Лунаева, И. Г. Скачек
Комп. верстка:
Е. Н. Паздниковой,
М. В. Егоровой, А. А. Веселова

Подписано в печать 02.11.11 г.
Формат 60 × 84 1/8.

Бумага офсетная. Печать офсетная.
Гарнитура "Times New Roman".
Печ. л. 19,25.

Тираж 300 экз. (1-й завод 1–110 экз.)
Заказ 108.

Издательство СПбГЭТУ "ЛЭТИ"

197376, Санкт-Петербург,
ул. Проф. Попова, 5
Тел.: (812) 346-45-23
Факс: (812) 346-28-56



УДК 621.396.969.11

Д. В. Гайворонский

ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДАЛЬНОМЕРНЫХ СИГНАЛОВ С МЕАНДРОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Модернизация систем радионавигации космического базирования предполагает расширение номенклатуры сигналов, передаваемых космическим сегментом. Как перспективный путь обеспечения внутрисистемной электромагнитной совместимости новых сигналов с существующими некоторые эксперты рассматривают расщепление спектра с помощью модуляции типа ВОС. Во многих недавних публикациях проводится идея о том, что подобный вид модуляции потенциально существенно улучшает такие ключевые параметры систем, как шумовая и многолучевая погрешности позиционирования. Обращается внимание на то, что подобный формат модуляции весьма неэффективен с точки зрения реального выигрыша в названных показателях в обмен на сопутствующее расширение полосы, и предлагаются значительно более действенные альтернативные варианты расширения спектра.

Спутниковая радионавигационная система, GPS, ГЛОНАСС, разделение сигналов, чип, меандровая модуляция, корреляционная функция

Повышение точности позиционирования потребителя в сложной помеховой обстановке является главной задачей модернизации всех спутниковых радионавигационных систем (СРНС). Эволюция радиоинтерфейсов таких систем предполагает, в частности, существенное расширение номенклатуры сигналов, передаваемых с борта космических аппаратов. При этом с учетом огромного парка выпущенных и эксплуатируемых приемников ныне излучаемые сигналы должны также оставаться в эфире, что сопряжено с необходимостью обеспечения их внутрисистемной электромагнитной совместимости с вновь вводимыми. Один из пропагандируемых путей решения этой проблемы состоит в применении в новых сигналах модуляции типа *binary offset carrier* (ВОС) [1]–[4], расщепляющей спектр сигнала и ранее упоминавшейся как кодирование кодом Манчестера. Зачастую в подобной модуляции усматривают и инструмент снижения шумовых и многолучевых погрешностей позиционирования. Между тем реальный выигрыш в тактических показателях системы, получаемый при этом формате модуляции в обмен на расширение полосы, достаточно далек от потенциального. В этой связи в предлагаемой статье анализируются характеристики сигналов формата ВОС и предлагаются альтернативные аналоги, заметно выигрывающие в точности измерения псевдодальности и разрешении сигналов с многолучевыми помехами.

Характеристики сигналов с расширяющей модуляцией типа ВОС. Применяемые в СРНС сигналы образованы псевдослучайной манипуляцией прямоугольных импульсов длительности Δ . Введение формата ВОС сводится к замене прямоугольного чипа отрезком меандра той же суммарной длительности Δ . Подобный прием приводит к расширению спектра сигнала, т. е. обострению главного пика его автокорреляционной функции, что призвано содействовать повышению потенциальной точности оценки псевдодальности и улучшению разрешения сигнала с многолучевой помехой. Кроме того, раздвоение спектра, присущее описанному способу модуляции при большом числе периодов меандра на чип, можно использовать для уплотнения сигналов, поместив спектр одного из них в провал спектра другого, ВОС модулированного.

В современной литературе по спутниковой навигации популярна символика, включающая в обозначение модуляции ВОС значения ее параметров: $\text{ВОС}(f_m, f_c)$, $\text{ВОС}(n_m, n_c)$. В первом случае f_m и f_c – соответственно, частоты меандра и следования чипов, во втором – n_m и n_c выражают те же частоты через их кратность некоторой условной опорной частоте f_r : $n_m = f_m / f_r$, $n_c = f_c / f_r$. Так как параметр n_c влияет только на полную длительность чипа Δ , далее достаточно ограничиться лишь его значением $n_c = 1$, т. е. $\text{ВОС}(n_m, 1)$.

Обратимся теперь к общей модели сигнала k -го космического аппарата (КА), $k = 1, 2, \dots, M$, представленного в виде его комплексной огибающей:

$$\dot{S}_k(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} a_{k,i} S_0(t - i\Delta), \quad (1)$$

где $a_{k,i} = \pm 1$ – бинарная кодовая последовательность длины N , манипулирующая чипы k -го сигнала; $S_0(t)$ – комплексная огибающая чипа, далее принимаемая прямоугольной и действительной с длительностью, равной периоду повторения чипов Δ . Очевидно, для традиционных сигналов $S_0(t)$ представляет собой прямоугольник длительности Δ , в то время как для сигналов типа ВОС $S_0(t)$ – отрезок меандра той же длительности. Пусть $u_0(t)$ обозначает прямоугольный «микрочип», чья длительность Δ_0 в $2n_m$ раз меньше длительности чипа: $\Delta_0 = \Delta / 2n_m$. Тогда для обычного сигнала в (1) в роли $S_0(t)$ должен фигурировать чип

$$S_0(t) = \sum_{i=0}^{2n_m-1} u_0(t - i\Delta_0), \quad (2)$$

а для сигнала формата $\text{ВОС}(n_m, 1)$

$$S_0(t) = \sum_{i=0}^{2n_m-1} (-1)^i u_0(t - i\Delta_0). \quad (3)$$

Для контроля уровня помехи множественного доступа (ПМД) между обычным и ВОС-сигналами следует рассчитать их взаимную корреляционную функцию (ВКФ), которая после несложных преобразований приводится к виду

$$R_0(\tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \rho(n) \rho_0(\tau - n\Delta_0),$$

где $\rho(n) = \frac{1}{2n_c} \sum_{i=n}^{2n_c-1} (-1)^{i-n} = \begin{cases} 0, n \equiv 0 \pmod{2}, \\ \frac{1}{2n_c}, n \equiv 1 \pmod{2} \end{cases}$ – ВКФ кодовых последовательностей чи-

пов: $a_i = 1, b_i = (-1)^i, i = 0, 1, \dots, 2n_m - 1$; $\rho_0(\tau) = \frac{1}{\Delta_0} \int_{-\infty}^{\infty} u_0(t)u_0(t-\tau)dt$ – автокорреляционная функция (АКФ) микрочипа. Результаты вычисления ВКФ *обычного и ВОС-чипов* (2), (3) представлены на рис. 1. Как видно, пик ρ_{cmax} ВКФ чипов (2) и (3) имеет уровень $1/2n_m$. Таким образом, введение в один из двух сигналов модуляции ВОС, т. е. замена прямоугольного чипа n_m -периодным отрезком меандра, снизит максимальный пик ВКФ сигналов как минимум в n_m раз.

Снижение взаимной помехи для рассматриваемой пары сигналов проявится, конечно, и в среднеквадратическом уровне ПМД. Несложно показать, что среднеквадратический уровень взаимной помехи между прямоугольным и меандровым чипами

$$\rho_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\Delta} \int_{-\Delta}^{\Delta} R_0^2(\tau) d\tau} = \frac{1}{2\sqrt{3}n_m}.$$

В отсутствие ВОС, т. е. при прямоугольных чипах обоих сигналов, среднеквадратическое значение помехи пропорционально среднеквадратическому значению АКФ прямоугольника, равному $1/\sqrt{3}$. Как видно, снижение и среднеквадратического уровня ПМД между двумя сигналами, обусловленное переходом к формату ВОС в одном из них, оценивается тем же показателем n_m – числом периодов меандра на чип.

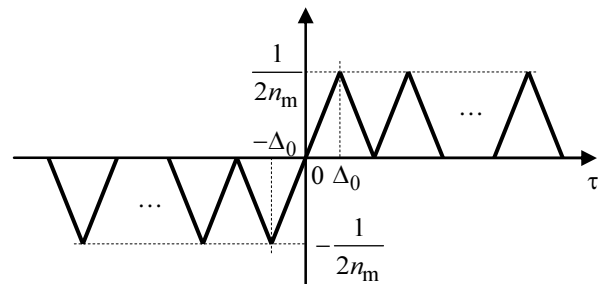


Рис. 1

На фоне отмеченного полезного влияния формата ВОС на разделимость сигналов его ожидаемые выгоды в части шумовой ошибки позиционирования не столь бесспорны, как это было бы при прямом укорочении прямоугольного чипа в n_m раз. Действительно, замена прямоугольника меандром, обостряя главный пик АКФ чипа, одновременно делает эту АКФ многолепестковой, причем уровни первого бокового и главного лепестков сближаются с ростом числа периодов меандра. Результатом этого является риск аномальных ошибок, т. е. перескока с главного пика АКФ на боковые, увеличивающего общую дисперсию измерений. Проблемы этого рода – абсолютно те же, что сопровождают вовлечение фазовых измерений в оценку псевдодальности: вероятность удержания измерителя на главном лепестке АКФ (разрешения многозначности) должна быть достаточно высокой. Что же касается разрешающей способности, вряд ли можно вообще считать формат ВОС действенным инструментом ее повышения, так как сильные боковые лепестки АКФ меандра при многолучевом приеме столь же вредны, как и широкая АКФ прямоугольного чипа без ВОС. Для графического подкрепления рассмотренных эффектов на рис. 2 даны АКФ

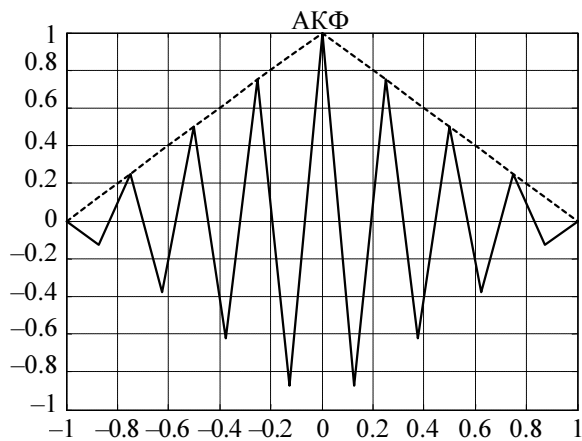


Рис. 2

Таблица 1

Тип чипа	$\rho_{a\max}$	$\rho_{c\max}$	ρ_{rms}
ВОС (1, 1)	0.5	0.5	0.2887
ВОС (2, 1)	0.75	0.25	0.1443
ВОС (3, 1)	0.8333	0.1666	0.0962
ВОС (4, 1)	0.8750	0.125	0.0722
ВОС (5, 1)	0.9	0.1	0.0577

чипа ВОС(4, 1) в сопоставлении с АКФ прямоугольного чипа (штриховая линия). В табл. 1 сведены значения максимального бокового лепестка АКФ $\rho_{a\max}$, а также максимума ($\rho_{c\max}$) и среднеквадратического уровня ВКФ (ρ_{rms}) чипа ВОС($n_m, 1$) с прямоугольным чипом для $n_m = 1, 2, \dots, 5$.

Альтернативные ВОС-варианты структуры чипа с улучшенными разрешающими и точностными характеристиками. В свете изложенного материала понятно, что модуляция ВОС неэффективно использует сопутствующее расширение полосы в части улучшения точностных и разрешающих характеристик сигнала. Представляется разумным, оставаясь в рамках общей идеи замены прямоугольного чипа длительности Δ неким широкополосным, составленным из m прямоугольных микрочипов длительности $\Delta_0 = \Delta / m$, попытаться подобрать закон формирования последнего из условия подавления боковых лепестков АКФ до минимально возможного уровня. Заметим, что, поскольку речь теперь идет не о меандре, длина m усложненного чипа не обязана быть четным числом. Понятно, что для длин чипа в числе микрочипов $m = 3, 4, 5, 7, 11, 13$ сформулированная задача приведет к бинарным кодам Баркера, для которых боковой лепесток предельно мал и равен $1/m$. Для других длин m подходящий закон манипуляции микрочипов отыскивался компьютерным перебором. При этом на первом шаге отбирались все последовательности, имеющие минимальный уровень бокового лепестка АКФ $\rho_{a\max}$. На втором шаге оставались лишь те, для которых уровень ВКФ с обычным прямоугольным чипом $\rho_{c\max}$ минимален. Если после второго шага оставалось несколько последовательностей данной длины, из них выбирались предпочтительные пары, имеющие между собой наименьший пик взаимной корреляции $\rho_{12\max}$. Результаты поиска представлены в табл. 2, куда наряду с параметрами $\rho_{a\max}$, $\rho_{c\max}$, $\rho_{12\max}$ для отобранных последовательностей включено и среднеквадратическое значение ρ_{rms} их ВКФ с прямоугольным чипом.

На рис. 3, а представлена АКФ оптимальных последовательностей с длиной $m = 8$. Штриховые кривые на графике соответствуют модуляции ВОС, т. е. меандровым чипам. Как видно, формы чипов, основанные на оптимизированной модуляции микрочипов, существенно выигрывают в уровне бокового лепестка АКФ у чипов ВОС. Так, для длины $m = 8$ пик АКФ оптимизированного чипа $\rho_{a\max} \approx 0.25$ (–12 дБ), что в 3.5 раза или на 11 дБ ниже аналогичного параметра чипа ВОС (4, 1), содержащего то же число микрочипов ($\rho_{a\max} = 0.875$, т. е. –1.16 дБ, см. табл. 1).

Таблица 2

m	Последовательность	$\rho_{a \max}$	$\rho_{c \max}$	ρ_{rms}	Предпочтительные пары	$\rho_{12 \max}$
4	+ - + +	0.25	0.5000	0.2887	–	–
5	+ - + + +	0.2	0.6000	0.3540	–	–
6	- - + - + +	0.3333	0.3333	0.2152	1–2	0.6667
	- + - - + +			0.1667		
7	- + - - + + +	0.1429	0.4286	0.2044	–	–
8	+ + - - + - + +	0.25	0.2500	0.1443	1–2	0.7500
	+ - - - + + - +			0.1141		

На рис. 3, б приведена ВКФ оптимизированного чипа длины $m = 8$ с прямоугольным. Видно, что определенной платой за преимущество найденных форм чипов в уровне боковых лепестков АКФ оказывается некоторое возрастание взаимной помехи. Так, при той же длине $m = 8$ пик ВКФ оптимизированного чипа с прямоугольным $\rho_{c \max} \approx 0.25$ (–12 дБ), тогда как при модуляции ВОС (4, 1) этот показатель вдвое, или на 6 дБ, ниже ($\rho_{c \max} \approx 0.125$, т. е. –18 дБ, см. табл. 1). В то же время при оценке взаимной помехи такого типа среднеквадратическим уровнем разница заметно уменьшается: $\rho_{\text{rms}} \approx 0.11$ (–19 дБ) для оптимизированного чипа против $\rho_{\text{rms}} \approx 0.07$ (–23 дБ) для ВОС (4, 1). В любом случае основную нагрузку по разделению сигналов всех КА, как пилотных, так и информационно-модулированных, несут дальномерные коды, при адекватном выборе которых отмеченный проигрыш предлагаемых чипов формату ВОС в корреляции с прямоугольником практически никак не проявится.

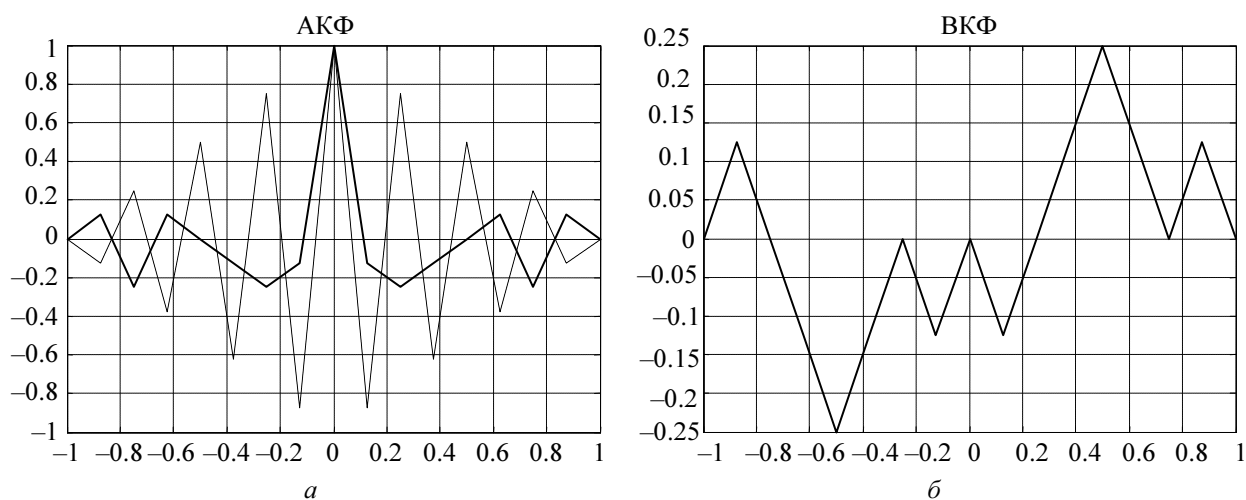


Рис. 3

На основании изложенного можно сделать следующие выводы. Проведенное исследование показало, что модуляция типа ВОС не может рассматриваться как результативный инструмент улучшения точностных и разрешающих показателей СРНС за счет расширения спектра дальномерных сигналов. Значительно эффективнее в этом отношении расширение спектра с использованием предложенных структур чипов, оптимизированных по уровню автокорреляционных боковых лепестков и взаимной корреляции с прямоугольным чипом.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» (государственный контракт № 16.740.11.0715 от 08.06.2011 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Betz J. W. Description of the L1C signal // In ION GNSS 19th International Technical Meeting of the Satellite Division, 26–28 Sept. 2006. Fort Worth, TX. P. 2080–2091.
2. Interface Specification. Navstar GPS Space Segment // User Segment L1 Interfaces. Draft IS-GPS-800 / Space and missile systems center. Navstar GPS joint program Office. El Segundo. CA, USA, 2006.
3. Interface Control Document (Draft) GAL OS SIS ICD/D, 23.05.2006.
4. GNSS album: images and spectral signatures of the new GNSS signals / S. Lo, A. Chen, P. Enge, G. Gao // Inside GNSS. May/June 2006. P. 46–56.

D. V. Gayvoronsky

NEW CAPABILITIES OF ENHANCING RANGING SIGNALS CHARACTERISTICS AT THE COST OF CHIP STRUCTURE COMPLICATION

Modernization of the space-based radio navigation means among other things expansion of the space segment signal nomenclature. It is a popular view that the modulation of BOC type is a promising way to provide intrasystem electromagnetic compatibility of the novel signals with the currently existing. In a number of recent papers the idea is promoted that the BOC modulation is potentially capable of highly improving such key parameters of satellite-based navigation as noise and multipath positioning errors. In this publication the attention is drawn to a quite inefficient way in which BOC utilizes signal spectrum spreading versus the gain in the abovementioned characteristics and some significantly more productive alternatives are proposed.

Satellite radio navigational systems, GPS, GLONASS, signal multiplexing, chip, BOC modulation, correlation function

УДК.621.319.1; 621.385.6.62-488

А. Антия, А. А. Иванов

ПОЛОСОВЫЕ ФИЛЬТРЫ ДИАПАЗОНОВ СВЧ И КВЧ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ

Представлены новые способы построения электрически перестраиваемых полосовых фильтров диапазонов СВЧ и КВЧ на основе щелевых резонаторов, сформированных на структуре «сегнетоэлектрическая пленка – диэлектрическая подложка». Определены основные соотношения между эквивалентными параметрами элементов контура и щелевой линии. Показана возможность реализации полосового фильтра.

Полосовые фильтры на щелевых резонаторах, перестраиваемые фильтры на слоистых структурах с сегнетоэлектрической пленкой

Полосовые фильтры сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона находят широкое применение в радиоэлектронной аппаратуре. Входные цепи СВЧ-аппаратуры различного функционального назначения всегда содержат их в своем составе. С практических позиций важным дополнительным качеством фильтров является электрическая перестройка их амплитудно-частотных характеристик (АЧХ). Многие попытки построения СВЧ-фильтров с электрической перестройкой базируются на использовании нелинейных конденсаторов, включенных в объемные резонаторы. Ограниченные возможности электрической перестройки АЧХ фильтров и конструктивные сложности, возникающие при такой реализации, вполне очевидны.

Альтернативным направлением в построении электрически перестраиваемых фильтров СВЧ является использование объемных резонаторов с перестройкой резонансной частоты. В диапазонах СВЧ и КВЧ для этой цели можно использовать резонансные отрезки щелевых линий, образованных на диэлектрической подложке с нанесенной на ее поверхность сегнето-

электрической пленкой [1]. Электрическая перестройка резонансной частоты объемного резонатора возникает при изменении диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки при подаче управляющего напряжения. Сдвиг резонансной частоты зависит от ширины щели, толщины сегнетоэлектрической пленки, изменения ее диэлектрической проницаемости. Эти же параметры определяют добротность резонатора, а следовательно, затухание в рабочей полосе фильтра и скорость нарастания его АЧХ вне рабочей полосы фильтра. Электрически перестраиваемые объемные резонаторы можно рассматривать как базовые элементы при проектировании фильтров с электрической перестройкой.

В данной статье исследована возможность построения полосовых фильтров на основе перестраиваемых объемных резонаторов на основе щелевых линий.

1. *Перестраиваемые объемные резонаторы.* Рассмотрим короткозамкнутый и разомкнутый отрезки щелевой линии (рис. 1, а), образованной на диэлектрической подложке с сегнетоэлектрической пленкой (СЭП). Обозначим $\dot{\gamma}$ – постоянную распространения электромагнитной волны в щелевой линии. Очевидно, что в общем случае $\dot{\gamma} = \gamma' - j\gamma''$, где γ'' – коэффициент затухания в щелевой линии, вызванный двумя причинами: диэлектрическими потерями в сегнетоэлектрической пленке γ''_{ε} и потерями в электродах линии γ''_{σ} . Длина резонансного отрезка кратна половине длины волны в щелевой линии. Пусть $l = \frac{\pi}{\gamma'}$. В зави-

симости от выбранного сечения по длине резонатора его можно представить эквивалентным резонансным контуром. Эквивалентное представление в виде последовательного резонансного контура возможно в плоскости короткого замыкания полуволнового короткозамкнутого отрезка линии (рис. 1, б), и на длине $l/2$ разомкнутого отрезка линии (рис. 1, в). Можно показать, что значение емкости (C), индуктивности (L) и сопротивления потерь (r) в таком контуре могут быть рассчитаны на резонансной частоте по формулам

$$L = \frac{Z_s}{4\gamma} \left(\frac{\partial \gamma}{\partial f} \right)_{f_0}, \quad C = \frac{1}{\omega_0^2 L}, \quad r = \frac{Z_s \gamma'' \pi}{\gamma},$$

где Z_s – волновое сопротивление щелевой линии; f_0 – резонансная частота контура.

Соотношение для собственной добротности контура можно получить в виде

$$Q_0 = \frac{f_0}{2\gamma''} \left(\frac{\partial \gamma}{\partial f} \right)_{f_0}.$$

При высокой добротности Q_0 можно представить в виде

$$Q_0^{-1} = Q_{\varepsilon}^{-1} + Q_{\sigma}^{-1},$$

где Q_{ε} – добротность контура, определяемая тангенсом угла диэлектрических потерь сегнетоэлектрической пленки; Q_{σ} – добротность контура, определяемая проводимостью σ электродов щелевой линии.

Анализ характеристик резонаторов (и колебательных контуров) справедлив только при малом затухании. В данном случае $\gamma'' \ll \gamma'$ и линейная часть разложения $\dot{\gamma}(\varepsilon)$ в ряд Тейлора

дает $\gamma''_{\varepsilon} = \varepsilon \frac{\partial \gamma}{\partial \varepsilon} \operatorname{tg} \delta$. Поэтому соотношение для расчета Q_{ε} можно преобразовать к виду

$$Q_\varepsilon = \frac{f_0}{2\varepsilon} \left(\frac{\partial f}{\partial \varepsilon} \operatorname{tg} \delta \right)_{f_0}^{-1}.$$

В этом соотношении производная $\frac{\partial f}{\partial \varepsilon}$ может быть интерпретирована как наклон зависимости сдвига резонансной частоты резонатора от изменения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки при постоянном значении $\gamma' = \frac{\pi}{l}$. Таким образом, с уменьшением ε под действием управляющего напряжения растет f_0 , несколько уменьшается $\operatorname{tg} \delta$ и растет Q_ε .

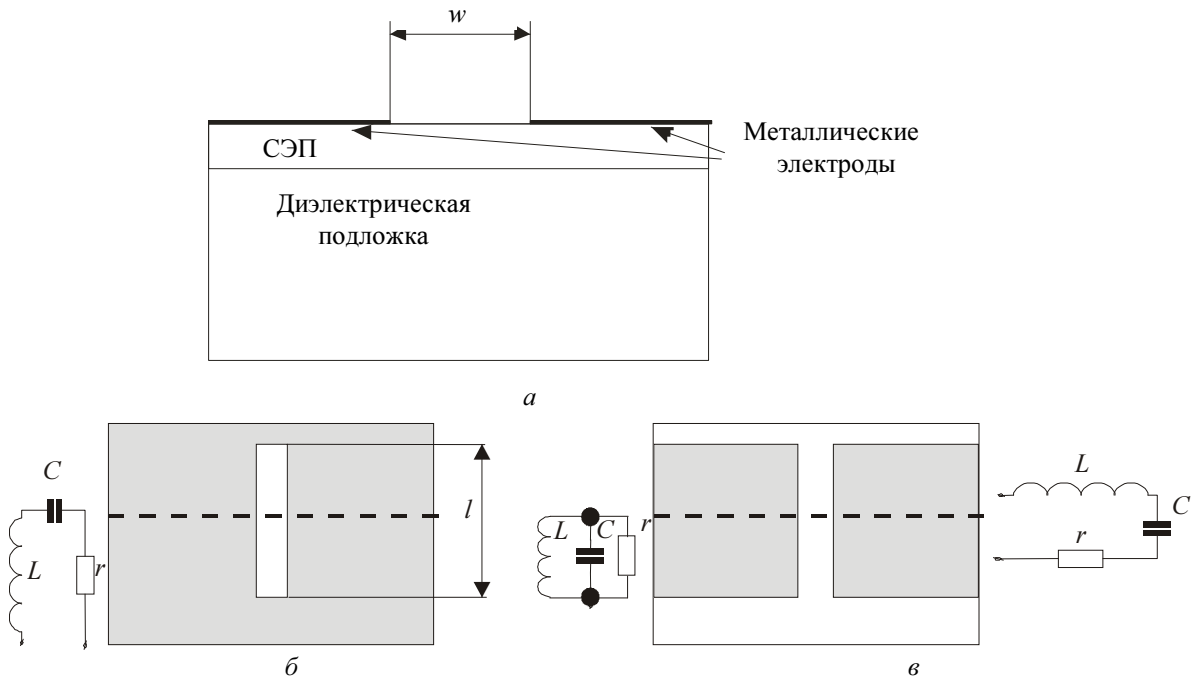


Рис. 1

Добротность резонатора, определяемая затуханием в электродах линии, может быть представлена в виде

$$Q_\sigma = \frac{f_0}{2\gamma''_\sigma} \left(\frac{\partial \gamma}{\partial f} \right)_{f_0}.$$

Таким образом, соотношение для добротности резонатора можно преобразовать к виду

$$Q_0 = \frac{1}{\xi (\operatorname{tg} \delta + q)},$$

где $\xi = 2\varepsilon \frac{1}{f_0} \frac{\partial f}{\partial \varepsilon}$, $q = \gamma''_\sigma \left(\varepsilon \frac{\partial \gamma}{\partial \varepsilon} \right)^{-1}$.

В табл. 1 представлены значения резонансной частоты щелевых резонаторов от изменения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки при постоянных значениях γ на частоте 10 ГГц. Длина резонаторов определяется как $l = \frac{\pi}{\gamma}$. В табл. 2 приведены

значения добротностей резонаторов, рассчитанные при $\sigma = 5.4 \cdot 10^7 \text{ См}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, $\text{tg } \delta = 10^{-2}$. Данные табл. 1 и 2 получены при толщине диэлектрической подложки 0.5 мм и диэлектрической проницаемости, равной 10.

Объемные резонаторы, представленные на рис. 1, в, эквивалентны параллельному контуру. Плоскость холостого хода разомкнутого резонатора расположена на половине длины короткозамкнутого резонатора. Эквивалентные L и C и шунтирующая проводимость G вычисляются по формулам

$$C = \frac{Y_s}{4\gamma} \left(\frac{\partial \gamma}{\partial f} \right)_{f_0}, \quad L = \frac{1}{\omega_0^2 C}, \quad G = Y_s \gamma'' l,$$

где $Y_s = \frac{1}{Z_s}$.

Таблица 1

$\gamma = 0.62 \text{ мм}^{-1}, d_1 = 1 \text{ мкм}, w = 100 \text{ мкм}$				$\gamma = 0.57 \text{ мм}^{-1}, d_1 = 1 \text{ мкм}, w = 100 \text{ мкм}$			
ε	600	900	1200	ε	600	900	1200
$f, \text{ ГГц}$	11.535	10.69	10.0	$f, \text{ ГГц}$	11.275	10.572	10.0
$\gamma = 0.7 \text{ мм}^{-1}, d_1 = 2 \text{ мкм}, w = 150 \text{ мкм}$				$\gamma = 0.78 \text{ мм}^{-1}, d_1 = 2 \text{ мкм}, w = 150 \text{ мкм}$			
ε	600	900	1200	ε	600	900	1200
$f, \text{ ГГц}$	11.895	10.845	10.0	$f, \text{ ГГц}$	12.25	10.932	10.0

Таблица 2

$\gamma = 0.62 \text{ мм}^{-1}, d_1 = 1 \text{ мкм}, w = 100 \text{ мкм}$				$\gamma = 0.57 \text{ мм}^{-1}, d_1 = 1 \text{ мкм}, w = 150 \text{ мкм}$			
ε	600	900	1200	ε	600	900	1200
Q_f	222	215	209	Q_f	290	283	276
Q_ε	303	235	200	Q_ε	370	280	234
Q_0	128	112	102	Q_0	162	140	129
$\gamma = 0.7 \text{ мм}^{-1}, d_1 = 2 \text{ мкм}, w = 100 \text{ мкм}$				$\gamma = 0.78 \text{ мм}^{-1}, d_1 = 2 \text{ мкм}, w = 150 \text{ мкм}$			
ε	600	900	1200	ε	600	900	1200
Q_f	218	207	198	Q_f	288	275	264
Q_ε	199	166	149	Q_ε	233	188	165
Q_0	104	92	85	Q_0	129	111	101

Очевидно, что собственная добротность и перестройка резонансной частоты параллельного контура совпадают с последовательным контуром.

Объемные резонаторы могут быть представлены в виде эквивалентного контура, образованного двумя отрезками щелевой линии (короткозамкнутыми или разомкнутыми) длиной l_i и $l - l_i$, где $l = \frac{\pi}{\gamma}$, $0 < l_i < \frac{\lambda}{4}$.

Для короткозамкнутого резонатора параметры эквивалентного контура рассчитываются по формулам

$$L = \frac{Z_s}{\omega_0} \text{tg}(\gamma' l_i), \quad C = \frac{\text{ctg}(\gamma' l_i)}{\omega_0 Z_s}, \quad G = \frac{\gamma'' \pi}{\gamma Z_s \text{tg}^2(\gamma' l_i)}, \quad Q_0 = \frac{\gamma \text{tg}(\gamma' l_i)}{\pi \gamma''}.$$

Для разомкнутого контура $C = \frac{\text{tg}(\gamma' l_i)}{Z_s \omega_0}$, $L = \frac{Z_s}{\omega_0} \text{ctg}(\gamma' l_i)$, $Q_0 = \frac{\gamma \text{tg}(\gamma l_i)}{\pi \gamma}$, эквивалентная шунтирующая проводимость $G = \frac{\gamma'' \pi}{\gamma Z_s}$.

Перестройка резонансной частоты в этом случае сохраняется в предшествующих оценках, а добротность контура зависит от выбора длины отрезка l_i , эквивалентного индуктивности контура.

2. *Конструкции полосовых фильтров.* Конструкция полосового фильтра, образованного несколькими полуволновыми короткозамкнутыми щелевыми резонаторами, связанными с микрополосковой линией (МПЛ) и расположенными друг от друга на расстоянии, равном четверти длины волны в МПЛ, представлена на рис. 2. Эквивалентная схема связи МПЛ и щелевой линии показана на рис. 3. Как видно, резонатор включается последовательно в МПЛ. Таким образом, если плоскость эквивалентного представления резонатора совпадает с плоскостью порта его включения в МПЛ, то резонатор включается последовательно в МПЛ либо в виде параллельного колебательного контура, либо последовательного. С учетом четвертьволновых связей между резонаторами возникает многорезонаторный полосно-запирающий фильтр (ПЗФ) или полосно-пропускающий фильтр (ППФ). На рис. 4 представлена эквивалентная схема полосового фильтра, где Z_i – полные сопротивления колебательных контуров, эквивалентных резонаторам. Управляющее напряжение подается на сегнетоэлектрическую пленку через управляющие электроды (рис. 5), толщина которых меньше толщины скин-слоя в материале электрода. По технологическим причинам управляющие электроды образованы слоем платины.

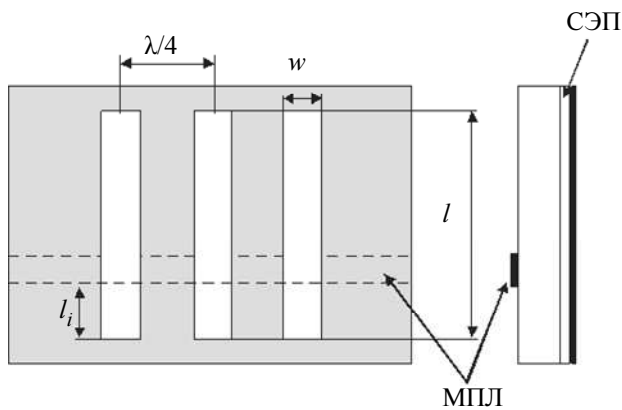


Рис. 2

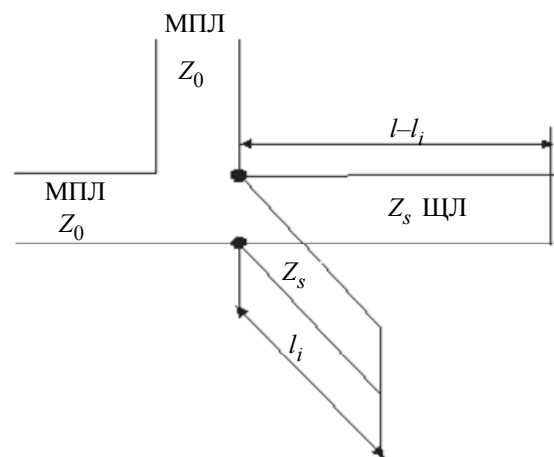


Рис. 3

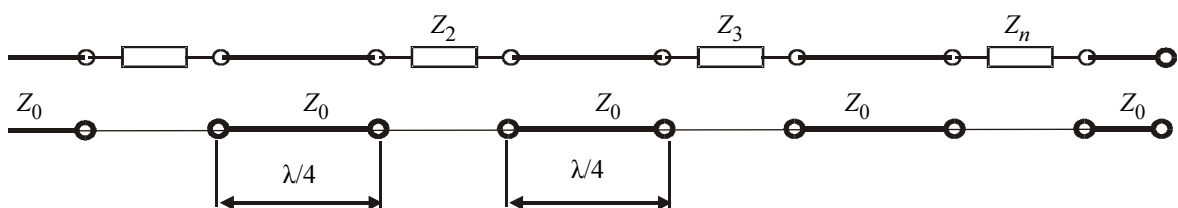


Рис. 4

АЧХ фильтра зависят от соотношения волновых сопротивлений щелевых линий, образующих резонаторы, и микрополосковой линии.

Расчет волнового сопротивления микрополосковой линии можно выполнить с высокой точностью на основе различных аппроксимирующих соотношений. Волновое сопротивление щелевой линии с СЭП выполнено в [1], [2].

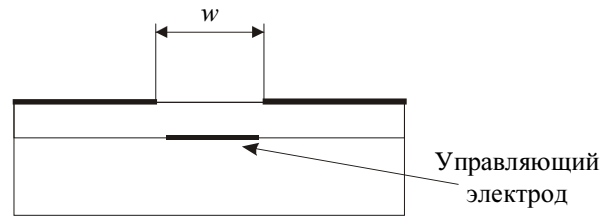


Рис. 5

Значения волновых сопротивлений и характер их зависимости, полученный по [1], для щелевой линии (толщина подложки 0.5 мм и диэлектрическая проницаемость 9.8, толщина сегнетоэлектрической пленки 2 мкм и диэлектрическая проницаемость 1250) представлен на рис. 6.

Расчет АЧХ полосового фильтра, эквивалентная схема которого представлена на рис. 4, выполнен на основе фильтра-прототипа нижних частот с заданной аппроксимацией его АЧХ и частотного преобразования от ФНЧ к полосовому фильтру [3]. Выбор прототипа и порядок фильтра определяются требованиями к фильтру как в полосе заграждения, так и за ее пределами. В данной статье рассмотрены две наиболее известные аппроксимации АЧХ фильтра по Баттерворту и Чебышеву.

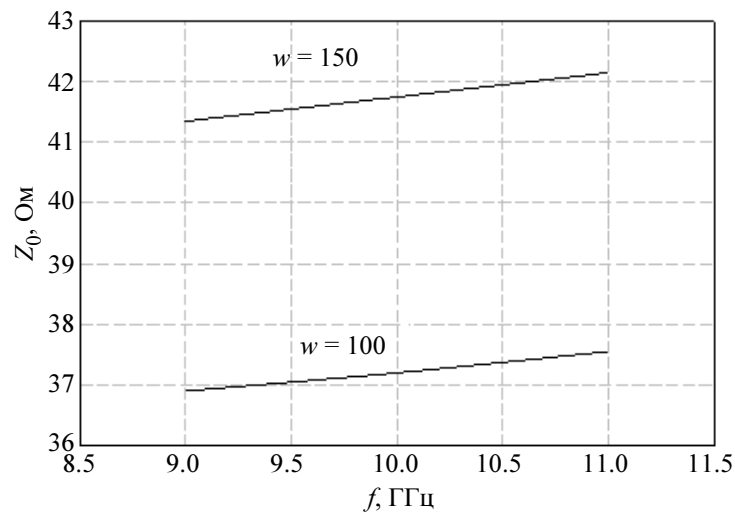


Рис. 6

Входную проводимость фильтра-прототипа без учета потерь можно получить в виде лестничной дроби при условии его нагрузки на волновое сопротивление линии. Например, для трехзвенного фильтра-прототипа имеем

$$Y_{\text{вх}} = \frac{1}{jxg_1Z_0 + \frac{1}{jxg_2/Z_0 + \frac{1}{jxg_3Z_0 + Z_0}}}, \quad (1)$$

где g_1, g_2, g_3 – параметры аппроксимации АЧХ фильтра, равные нормированным сопротивлениям индуктивностей и нормированным проводимостям емкостей на частоте среза Ω фильтра-прототипа: $g_n = \frac{\Omega L_n}{Z_0}, n = 1, 3; g_2 = \Omega C_2 Z_0; x = \frac{\omega}{\Omega}$ – нормированная частота;

Z_0 – в рассматриваемом случае волновое сопротивление МПЛ. Для фильтров более высоких порядков можно записать соотношение для $Y_{\text{вх}}$, аналогичное (1).

Входную проводимость полосового фильтра третьего порядка, схема которого представлена на рис. 4, можно записать в виде лестничной дроби

$$Y_{\text{вх}} = \frac{1}{Z_1 + \frac{1}{Z_2 / Z_0^2 + \frac{1}{Z_3 + Z_0}}}, \quad (2)$$

где Z_1, Z_2, Z_3 – полные реактивные сопротивления контуров, эквивалентных щелевым резонаторам.

$$\text{Для ПЗФ } Z_n = -j \frac{\omega}{C(\omega^2 - \omega_0^2)}, \text{ для ППФ } Z_n = -j \frac{L(\omega^2 - \omega_0^2)}{\omega}, \text{ где } \omega_0^2 = \frac{1}{LC} - \text{резонансная частота объемных резонаторов.}$$

Используя условия частотного преобразования от фильтра-прототипа к полосовым фильтрам [3]. Для ПЗФ оно имеет вид $x = -\frac{\omega \Delta \omega}{\omega^2 - \omega_0^2}$, где $\Delta \omega = \omega_2 - \omega_1$ – рабочая полоса заграждения фильтра, $\omega_0 = \sqrt{\omega_1 \omega_2}$ – центральная частота полосы заграждения фильтра.

Для ППФ $x = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega \Delta \omega}$.

Соотношения (1) и (2) становятся идентичными при условии, что $Z_n = jxg_nZ_0$. Подставив сюда соотношения для Z_n и x , найдем соотношения для определения индуктивностей и емкостей контуров, эквивалентных резонаторам. Для ПЗФ получим

$$C_n = \frac{1}{\Delta \omega g_n Z_0}, \quad L_n = \frac{1}{\omega^2 C_n}.$$

$$\text{Для ППФ } L_n = \frac{g_n Z_0}{\Delta \omega}, \quad C_n = \frac{1}{\omega_0^2 L_n}.$$

Комплексный частотный коэффициент передачи зависит от порядка фильтра. Если пренебречь частотной зависимостью коэффициента трансформации четвертьволновых отрезков линии (что вполне допустимо в пределах рабочей полосы фильтра), то для фильтра третьего порядка

$$\dot{S}_{21} = \frac{2}{Y_0^3 \cdot Z_1 \cdot Z_2 \cdot Z_3 + Y_0^2 \cdot Z_2 (Z_1 + Z_3) + Y_0 (Z_1 + Z_2 + Z_3) + 2},$$

$$\dot{S}_{21} = \frac{2}{S},$$

где $S = Y_0^4 \cdot Z_1 \cdot Z_2 \cdot Z_3 \cdot Z_4 + Y_0^3 \cdot Z_2 \cdot Z_4 (Z_1 + Z_4) + Y_0^2 (Z_1 \cdot Z_2 + Z_2 \cdot Z_3 + Z_3 \cdot Z_4 + Z_1 \cdot Z_4) + Y_0 (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4) + 2$ (табл. 3).

Для фильтров более высоких порядков \dot{S}_{21} может быть получен по аналогии с видом \dot{S}_{21} предыдущего порядка. Модуль коэффициента передачи $|\dot{S}_{21}|$ определяет АЧХ фильтра.

Таблица 3

$f_0(\varepsilon_1 = 1200) = 10 \text{ ГГц}, d_2 = 0.5 \text{ мм}, e_2 = 10, Z_m = 120 \text{ Ом}, \lambda/4 = 3.161 \text{ мм}$						
$d_2 = 1 \text{ мкм}, w = 100 \text{ мкм}, \gamma' = 0.632 \text{ мм} (L = 5 \text{ мм}) \gamma'' = 1.79 \text{ мм}$						
ε_1	$S_{21}\text{CH}, \text{ дБ}$	$S_{21}\text{BW}, \text{ дБ}$	L_1	L_2	L_3	L_4
1200	-51.853	-51.861	2.839E-4	6.533E-4	6.533E-4	2.839E-4
900	-59.278	-61.754	CH			
600	63.743	-66.074	3.99E-04	4.75E-03	6.29E-04	3.03E-04
$d_2 = 1 \text{ мкм}, w = 150 \text{ мкм}, \gamma' = 1.4292 \text{ мм} (L = 2.198 \text{ мм}) \gamma'' = 6.007 \text{ мм}$						
ε_1	$S_{21}\text{CH}, \text{ дБ}$	$S_{21}\text{BW}, \text{ дБ}$	L_1	L_2	L_3	L_4
1200	-41.415	-42.268	1.25E-04	2.88E-04	2.88E-04	1.25E-04
900	-42.694	-46.328	CH			
600	-39.072	-43.052	1.76E-04	2.09E-04	2.77E-04	1.34E-04
$d_2 = 2 \text{ мкм}, w = 100 \text{ мкм}, \gamma' = 0.78815 \text{ мм} (L = 3.986 \text{ мм}) \gamma'' = 2.937 \text{ мм}$						
ε_1	$S_{21}\text{CH}, \text{ дБ}$	$S_{21}\text{BW}, \text{ дБ}$	L_1	L_2	L_3	L_4
1200	-44.515	-45.115	2.27E-04	5.22E-04	5.22E-04	2.27E-04
900	-48.149	-51.34	CH			
600	-49.05	-52.34	3.13E-04	3.80E-04	5.03E-04	2.42E-04
$d_2 = 2 \text{ мкм}, w = 150 \text{ мкм}, \gamma' = 0.70676 \text{ мм} (L = 4.445 \text{ мм}) \gamma'' = 2.38 \text{ мм}$						
ε_1	$S_{21}\text{CH}, \text{ дБ}$	$S_{21}\text{BW}, \text{ дБ}$	L_1	L_2	L_3	L_4
1200	-47.2	-47.58	2.53E-04	5.82E-04	5.82E-04	2.53E-04
900	-51.764	-54.746	CH			
600	-54.228	-57.163	3.56E-04	4.23E-04	5.60E-04	2.701E-4

Рассмотрим АЧХ ПЗФ, резонаторы которого образованы индуктивными короткозамкнутыми отрезками щелевой линии $l_{i,n}$ и емкостным отрезком $l - l_{i,n}$ при условии, что на частоте ω_0 постоянная распространения в резонаторах одинакова и равна $\gamma = \frac{\pi}{l}$. Значение эквивалентной емкости резонатора и ее расчетное значение в зависимости от выбранной аппроксимации должны быть равными

$$\frac{\text{ctg}(\gamma l_{i,n})}{\omega_0 Z_{sn}} = \frac{1}{\Delta\omega Z_0 g_n}.$$

Отсюда следует соотношение, устанавливающее связь между относительной полосой пропускания $\delta = \frac{\Delta\omega}{\omega_0}$ и конструктивными параметрами фильтра

$$\delta = \frac{Z_{sn}}{Z_0 g_n} \text{tg}(\gamma l_{i,n}). \quad (3)$$

В конструкции фильтра соотношения между волновыми сопротивлениями $\frac{Z_{sn}}{Z_0} < 1$, значения g_n определяются видом аппроксимации АЧХ фильтра-прототипа, но для фильтров высокого порядка $g_n < 4$. Поэтому на основании соотношения (3) относительную рабочую полосу фильтра можно обеспечить в широком интервале значений выбором конструктивных параметров фильтра.

Изменение АЧХ при перестройке фильтра вызывают только незначительная частотная зависимость волнового сопротивления щелевой линии (см. рис. 6) и трансформации четвертьволновых отрезков МПЛ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

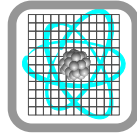
1. Сегнетоэлектрические пленки и устройства на сверх- и крайне высоких частотах / А. А. Иванов, И. Г. Миرونенко, А. А. Семенов и др. СПб.: Элмор, 2007.
2. Аття А., Иванов А. А. Волновое сопротивление щелевых и многощелевых линий на слоистых подложках // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 8. С. 3–7.
3. Маттей Д. Л., Янг Л., Джонс Е. М. Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. М.: Связь, 1972.

A. Attia, A. A. Ivanov

BAND PASS FILTERS IN SUPER HIGH FREQUENCIES(SHF) AND EXTREMELY HIGH FREQUENCIES (EHF) BANDS WITH ELECTRICAL TUNING

New methods are represented for constructing band pass filters SHF and EHF bands, filters implemented using slotline structures based on dielectric structure. Introduced principal based on relation among slotline equivalent. parameters . Realization possibilities are Shown for Band pass filters.

Band pass filters based on slotline resonators, tunable band pass filters based on dielectric structures with ferroelectric film



УДК 681.7.068

Д. С. Агафонова

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВОЛОКОННОГО ДАТЧИКА ИСКРЫ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

Представлены результаты математического моделирования эффективности использования люминесцентного покрытия на основе родамина 6Ж (RBG) на кварцевом волокне. Показано, что имеет место повышение чувствительности волоконного датчика искры за счет увеличения доли захватываемого излучения и уменьшения потерь в волоконном тракте благодаря спектральному преобразованию распространяющегося излучения.

Волоконно-оптический датчик искры, люминесценция, родамин 6Ж, светорассеяние

Своевременная регистрация электрического искрения и электрической дуги является необходимым условием безопасной эксплуатации энергетических и крупных механических установок, нефте- и газопроводов и предприятий химической промышленности. Для этого могут быть использованы фотодетекторы и волоконно-оптические датчики (ВОД). Фотоэлектронные устройства, основанные на непосредственной регистрации излучения искры фотоприемником [1], обладают существенными недостатками – существует вероятность их ложного срабатывания в условиях сильных электромагнитных помех и электрического пробоя при высокой напряженности электрических полей в высоковольтных установках. Достоинством ВОД является низкая чувствительность к электромагнитным помехам. В то же время данный тип датчиков обладает относительно низкой чувствительностью к коротковолновой области свечения искры ($\lambda = 250 \dots 550$ нм) вследствие высоких потерь в волокне и низкой восприимчивости фотоприемника.

Существует ряд ВОД, в которых используется преобразование излучения, падающего на боковую поверхность полимерного волокна или оптоволоконного жгута, в волноводные моды за счет рассеяния [2], [3] на оптических неоднородностях волокна. Однако это преобразование крайне неэффективно, поэтому такие датчики позволяют регистрировать оптические потоки только большой плотности, например для детектирования электрической дуги.

Для повышения чувствительности волоконного датчика искры предлагается использование люминесцентного покрытия, позволяющего увеличить долю захватываемого излучения и уменьшить потери в волоконном тракте за счет спектрального преобразования

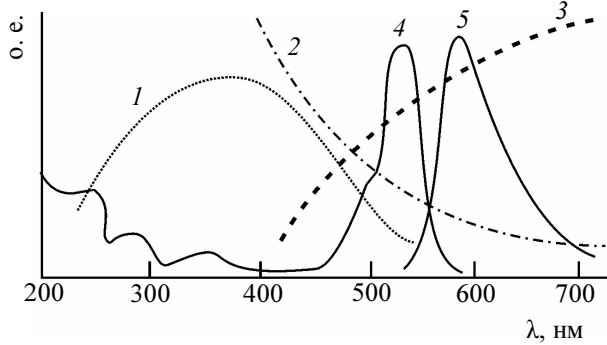


Рис. 1

распространяющегося излучения. В качестве люминесцентного вещества можно использовать органический краситель родамин 6Ж R6G, обладающий широкой полосой поглощения ($\lambda = 200 \dots 580$ нм) и высоким квантовым выходом [4]. Качественное сравнение спектральных характеристик излучения искры 1, потерь на светорассеяние в оптическом волокне 2, чувствительности кремниевого фотодиода 3, поглощения R6G 4 и люминесценции R6G 5 представлено на рис. 1. Предварительные эксперименты показали, что предлагаемый подход позволяет повысить чувствительность датчика искры и уменьшить его габариты [5].

В данной статье представлены результаты количественного анализа преобразования излучения искры в полезный сигнал фотодиода для двух способов бокового захвата излучения (светорассеяние и возбуждение люминесценции покрытия), а также влияния спектрального преобразования на потери в волоконном тракте. В работе были поставлены следующие задачи:

1. Теоретическая оценка эффективности возбуждения волноводных мод в кварцевом волокне через боковую поверхность за счет светорассеяния.
2. Экспериментальное определение эффективности возбуждения волноводных мод в кварцевом волокне с люминесцентным покрытием на основе родамина 6Ж через боковую поверхность.
3. Определение доли излучения искры, преобразующейся в полезный сигнал в фотоприемнике, с учетом потерь на светорассеяние при передаче оптического сигнала для волокна с люминесцентным покрытием и без такового.

Модель захвата излучения боковой поверхностью волоконного световода за счет светорассеяния. Потери в волокне для ультрафиолетового (УФ) и коротковолновой части видимого диапазонов в основном определяются рэлеевским рассеянием, причиной возникновения которого являются статистические флуктуации состава и плотности стекла, замороженные в стекле при его остывании. Оптические потери, обусловленные рэлеевским рассеянием, определяются формулой [6]

$$\alpha = \frac{A_{\text{рэл}}}{\lambda^4}, \quad (1)$$

где $A_{\text{рэл}}$ — коэффициент рэлеевского рассеяния (КРР). Для многомодовых световодов с нелегированной кварцевой сердцевиной КРР составляет $0.75 \text{ дБ} \cdot \text{мкм}^4/\text{км}$ [7].

В общем случае интенсивность рассеянного света определяется выражением [8]

$$I = I_0 k (1 + \cos^2 \theta) = I_0 \frac{9\pi^2 \varepsilon_0^2 N V^2}{2\lambda^4 L^2} \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon + \varepsilon_0} \right) (1 + \cos^2 \theta), \quad (2)$$

Здесь I_0 – интенсивность падающего света; θ – угол рассеяния; ε_0 – диэлектрическая проницаемость среды, в которой взвешены частицы; N – число частиц в рассеивающем объеме; V и ε – объем и диэлектрическая проницаемость частицы; L – расстояние от рассеивающего объема до точки наблюдения.

Выражение (2) задает угловую зависимость доли рассеянного излучения, коэффициент k включает в себя параметры рассеивающей среды и определяет долю рассеянного излучения для направления θ . В волоконном световоде светорассеяние приводит к изменению направления распространения излучения и в случае нарушения условия полного внутреннего отражения к вытеканию излучения из световедущей жилы [9]. Выделим слой толщиной dz (рис. 2) в поперечном сечении световода. Прошедшая через этот слой оптическая мощность будет определяться как

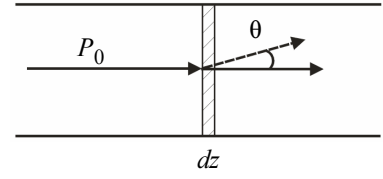


Рис. 2

$$P = P_0 \cdot k(1 + \cos^2 \theta) + P_0(1 - k), \quad (3)$$

где k – доля рассеянного излучения; θ – угол между направлением рассеяния и направлением распространения излучения. Слагаемое $P_0(1 - k)$ описывает не испытывавшее рассеяние излучение, а слагаемое $P_0 \cdot k(1 + \cos^2 \theta)$ задает угловое распределение доли рассеянного излучения. При рассмотрении волоконного световода в связи с аксиальной симметрией удобнее перейти к цилиндрической системе координат. На рис. 3 представлено: a – рассеяние мощности направляемого луча в сердцевине; b – угловое направление падающего на рассеиватель и рассеянного лучей относительно оси световода со ступенчатым профилем. Из геометрических соображений имеем:

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \theta'_z + \sin \theta_z \sin \theta'_z \cos(\theta_\varphi - \theta'_\varphi).$$

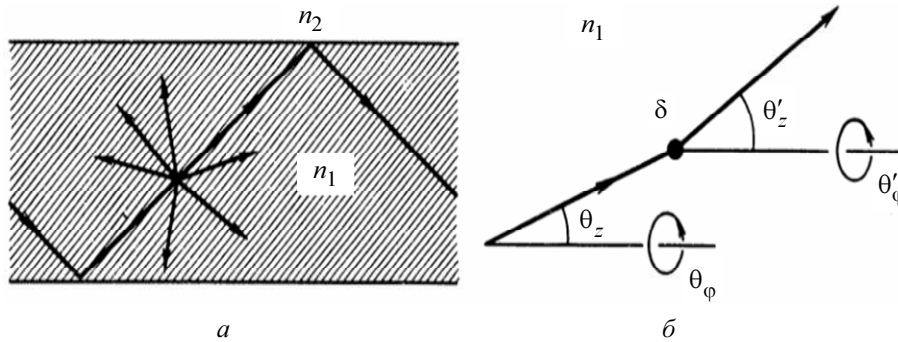


Рис. 3

В соответствии с условием распространения направляемых лучей в волноводе ($\theta_z < \theta_{кр}$) получим интегральный коэффициент K_θ , определяющий долю рассеянного излучения, относящегося к направляемым лучам:

$$K_\theta = \frac{\int_0^{2\pi} d\theta_\varphi \int_0^{\theta_{кр}} d\theta_z \int_0^{2\pi} d\theta'_\varphi \int_0^{\theta_{кр}} \left[1 + \left(\cos \theta_z \cos \theta'_z + \sin \theta_z \sin \theta'_z \cos(\theta_\varphi - \theta'_\varphi) \right)^2 \right] d\theta'_z}{2 \int_0^{2\pi} d\theta_\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta_z \int_0^{2\pi} d\theta'_\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[1 + \left(\cos \theta_z \cos \theta'_z + \sin \theta_z \sin \theta'_z \cos(\theta_\varphi - \theta'_\varphi) \right)^2 \right] d\theta'_z},$$

где $\theta_{кр}$ – критический угол. Для оптического волокна с апертурой $NA = 0.12$ коэффициент $K_\theta = 0.051$. Тогда на основании выражений (3) и (1) получаем ($dz = 1$ мкм):

$$k = \frac{1 - \frac{P}{P_0}}{1 - K_\theta} = \frac{1 - 10^{-\frac{A_{рэл}}{10\lambda^4}}}{1 - K_\theta}.$$

На рис. 4 представлена спектральная зависимость коэффициента k .

При боковом падении излучения ввиду пространственного поворота индикатрисы рассеяния на $\frac{\pi}{2}$ и при условии нормального падения ($\theta_z = \frac{\pi}{2}$) излучения на поверхность волоконного световода получим интегральный коэффициент K'_θ , определяющий долю рассеянного излучения, переходящего в направляемые лучи:

$$K'_\theta = \frac{\int_0^{2\pi} d\theta'_\varphi \int_0^{\theta_{кр}} \left[1 + (\sin \theta'_z \cos \theta'_\varphi)^2 \right] d\theta'_z}{2 \int_0^{2\pi} d\theta'_\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[1 + (\sin \theta'_z \cos \theta'_\varphi)^2 \right] d\theta'_z} = 0.031.$$

Тогда эффективность возбуждения волноводных мод будет

$$\left(\frac{P_{захв}}{P_0} \right)_\lambda = K'_\theta k(\lambda). \quad (4)$$

Спектральная зависимость эффективности возбуждения за счет светорассеяния представлена на рис. 4 (правая шкала).

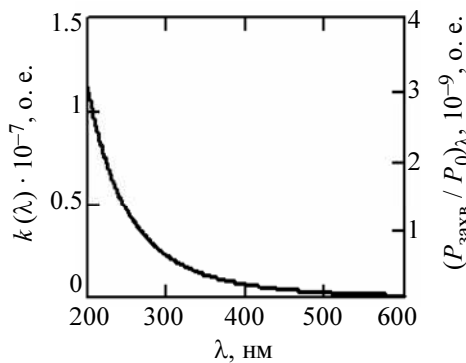


Рис. 4

Таким образом, сформулирована модель для расчета преобразования рассеянного излучения в направляемые моды при боковом падении на световод. Определена спектральная зависимость эффективности возбуждения волноводных мод.

Моделирование преобразования излучения искры в полезный сигнал фотоприемника для волоконного световода с люминесцентным покрытием и без него. Спектральный состав и яркость излучения электрической искры зависят от энергии, вкладываемой в разряд, материала электродов и состава газовой среды, но наибольший вклад вносят ионы металлов, возникающие при распылении электродов. Спектр электрической искры в основном дискретен, и его линии сосредоточены в УФ- и сине-зеленой частях видимой области.

Например, наиболее яркие спектральные линии ионов Fe лежат в спектральном интервале $\lambda = 250 \dots 450$ нм, Al – $\lambda = 300 \dots 400$ нм, Ag – $\lambda = 300 \dots 550$ нм, Cu – $\lambda = 320 \dots 530$ нм [10]. Для простоты анализа зададим спектральный состав излучения искры распределением Гаусса с максимумом на $\lambda_m = 425$ нм и границами 250 и 600 нм по уровню 0.1 от максимального значения (рис. 5, кривая 1):

$$g(\lambda) = \frac{-(\lambda - \lambda_m)^2}{2\Delta^2};$$

$$\Delta = \sqrt{\frac{(\lambda_b - \lambda_m)^2}{-2 \ln a^2}},$$

где λ_b – граничная длина волны; $a = 0.1$.

Преобразование излучения искры $g(\lambda)$ в полезный сигнал фотоприемника P_{PD} в общем случае будет происходить по закону

$$P_{PD} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} g(\lambda) \cdot P_{\text{мод}}(\lambda) \cdot P_{\text{пот}}(\lambda, L) \cdot S(\lambda) d\lambda,$$

где $P_{\text{мод}}(\lambda)$ – спектральная доля излучения, преобразующаяся в волноводные моды; $P_{\text{пот}}(\lambda, L)$ – спектральная зависимость потерь в волоконном световоде; $S(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность фотоприемника.

В случае захвата излучения светорассеянием спектральная доля излучения, преобразующаяся в волноводные моды, будет определяться выражением (4)

$$P_{\text{мод}}(\lambda) = \left(\frac{P_{\text{захв}}}{P_0} \right)_{\lambda}.$$

Потери в волокне для УФ- и коротковолновой части видимого диапазонов будут в основном определяться рэлеевским рассеянием:

$$P_{\text{пот}}(\lambda, L) = 10^{-\frac{A_{\text{рэл}} L}{\lambda^4}},$$

где L – длина волокна от места возбуждения волноводных мод до фотоприемника.

В качестве приемника излучения выбран кремниевый фотодиод, относительная спектральная чувствительность которого приведена на рис. 5, кривая 3. На рис. 5 также представлены зависимость относительных потерь на светорассеяние (кривая 2) и спектральная зависимость полезного сигнала фотоприемника: $P_{PD}(\lambda) = g(\lambda) \cdot P_{\text{мод}}(\lambda) \cdot P_{\text{пот}}(\lambda, L) \cdot S(\lambda)$ (кривая 4).

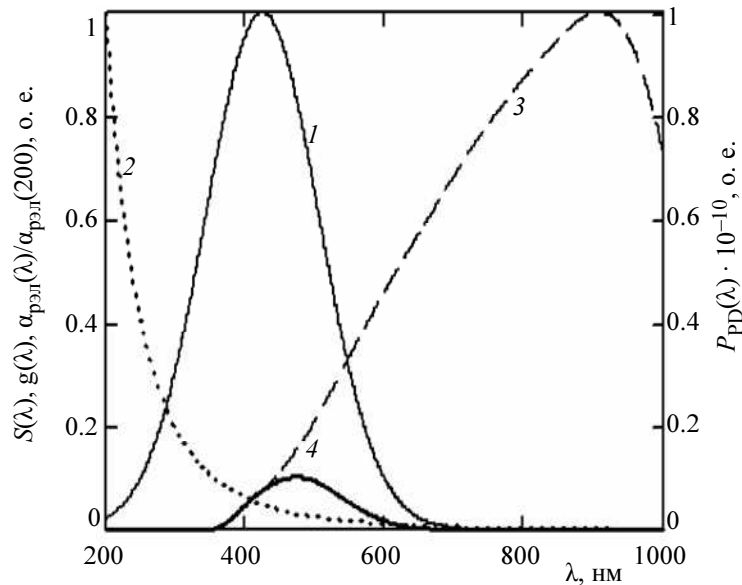


Рис. 5

Тогда доля излучения искры, преобразованная в полезный сигнал фотоприемника при захвате излучения за счет светорассеяния, будет определяться отношением $P_{PD} / \int_{200}^{650} g(\lambda)$ и для волоконного тракта длиной 10 и 100 м будет равна $1.07 \cdot 10^{-11}$ и $7.63 \cdot 10^{-12}$ соответственно.

При наличии люминесцентного покрытия на световоде преобразование излучения искры в волноводные моды имеет более сложный характер и зависит от доли поглощенной энергии люминофором и эффективности возбуждения волноводных мод в спектральном интервале люминесценции красителя. Автором экспериментально была определена полная, с учетом поглощения и переизлучения, эффективность преобразования излучения в волноводные моды для длины волны 532 нм, соответствующей максимуму поглощательной способности родамина 6Ж. В качестве источника излучения использовался полупроводниковый лазерный модуль KLM-530/20, покрытия толщиной 20 мкм и концентрация родамина 6Ж 0.5 %. Эффективность преобразования составляет $k_{R6G 532} = 2.1 \cdot 10^{-3}$.

Примем для простоты расчетов спектральную эффективность поглощения излучения с распределением $g(\lambda)$:

$$P_{R6G \lambda} = 1 - \exp(\sigma_{отн} \ln 0.001)g(\lambda), \quad (5)$$

где $\sigma_{отн}$ – относительный коэффициент поглощения родамина 6Ж [4]. Зависимость (5) получена из закона Бугера–Ламберта [8] при условии поглощения 99.9 % излучения на длине волны максимума кривой поглощения 532 нм. Спектральная эффективность поглощения представлена на рис. 6.

Спектральное распределение возбужденной люминесценции ($P_{л \lambda}$) определим как

$$P_{л \lambda} = P_{отн \lambda} \frac{\int_{500}^{700} P_{отн \lambda} d\lambda}{\int_{200} P_{R6G \lambda} d\lambda} q,$$

где $P_{отн \lambda}$ – относительный спектр люминесценции [4]; q – квантовый выход люминесценции родамина 6Ж, равный 0.95 [4].

В случае световода с люминесцентным покрытием спектральная доля излучения, преобразующаяся в волноводные моды, будет определяться выражением

$$P_{мод}(\lambda) = P_{л \lambda} k_{R6G 532}$$

а полезный сигнал фотоприемника выражением

$$P_{PD, R6G} = \int_{500}^{700} P_{л \lambda} \cdot k_{R6G 532} \cdot P_{пот}(\lambda, L) \cdot S(\lambda) d\lambda.$$

На рис. 7 представлены зависимости спектрального распределения люминесценции $P_{л \lambda}$, спектр излучения $P_{л \lambda} P_{пот}(\lambda, L)$, прошедшего по волокну длиной 100 м, и спектральное распределение полезного сигнала фотоприемника без учета $k_{R6G 532}$.

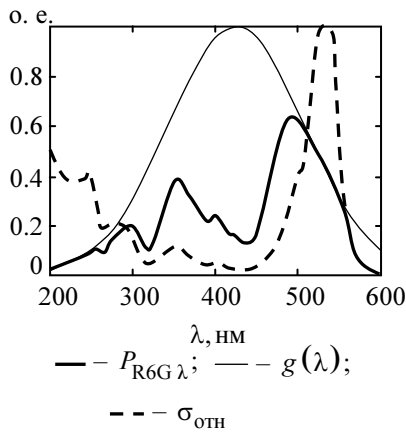


Рис. 6

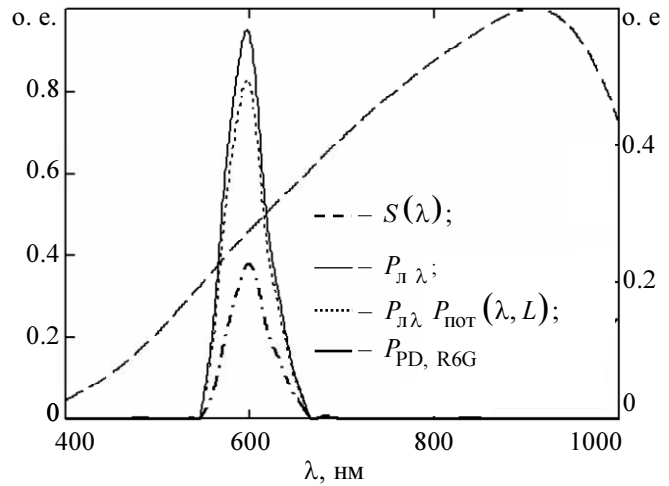


Рис. 7

Доля излучения искры, преобразованного в полезный сигнал фотоприемника при спектральном преобразовании излучения, будет определяться отношением $P_{PD, R6G} / \int_{200}^{650} g(\lambda) \cdot$

Для волоконного тракта длиной 10 и 100 м доля излучения, преобразованного в полезный сигнал, будет равна $1.44 \cdot 10^{-4}$ и $1.28 \cdot 10^{-4}$ соответственно.

В таблице приведены полученные расчетные значения полезной доли излучения, т. е. захваченной волокном и воспринятой фотоприемником. Из таблицы видно, что введение люминесцентного покрытия на основе органического красителя родамина 6Ж на волоконном кварцевом световоде позволяет увеличить долю излучения искры, преобразующегося в полезный сигнал, на семь порядков по сравнению с датчиком без люминесцентного покрытия.

Длина волокна, м	Способ захвата излучения	
	Светорассеяние	Люминесцентное покрытие
10	$1.07 \cdot 10^{-11}$	$1.44 \cdot 10^{-4}$
100	$7.63 \cdot 10^{-12}$	$1.28 \cdot 10^{-4}$

Таким образом, спектральное преобразование излучения искры в волоконном датчике с люминесцентным покрытием позволяет существенно повысить чувствительность датчика. Полученные результаты могут быть использованы при разработке волоконных сенсорных систем для энергетических и высоковольтных установок, электрических станций и для устройств предотвращения техногенных катастроф.

Работа выполнена при поддержке гранта для аспирантов, докторантов и молодых ученых «КЭОП 43».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современные средства релейной защиты и противоаварийной автоматики // Каталог спецэкспозиции. М.: Союзтехэнерго, 1989. С. 15.
2. Пат. 2237332 РФ, МПК⁷ С2 Н 02 Н 7/26. Волоконно-оптический датчик открытой электрической дуги / Ю. П. Казачков; заяв. и патентообл. Федеральное государственное унитарное предприятие «Науч.-исслед. ин-т импульсной техники»; № 2002126864/09; заявл. 07.10.02; опублик. 27.09.04.
3. Казачков Ю. П. Волоконно-оптический распределенный позиционно-чувствительный датчик электрической дуги // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 2. С. 145–147.
4. Перестраиваемые лазеры на красителях и их применение / С. М. Копылов, Б. Г. Лысой, С. Л. Серегин, О. Б. Чередниченко. М.: Радио и связь, 1991.
5. Агафонова Д. С., Сидоров А. И. Влияние люминесцентного покрытия на чувствительность волоконно-оптического датчика электрической искры // Тр. 9-й Междунар. конф. «Прикладная оптика – 2010», 2010. Т. 2. С. 214.

6. Коэффициенты рэлеевского рассеяния в высоколегированных одномодовых германо- и фосфоросиликатных световодах / М. Е. Лихачев, С. Л. Семенов, В. Ф. Хопин и др. // Электрон. журн. «Исследовано в России» (<http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/008.pdf>).

7. Fundamental optical attenuation limits in the liquid and glassy state with application to fiber optical waveguide materials / D. A. Pinnow, T. C. Rich, Jr. F. W. Ostermayer, Jr. M. DiDomenico // Appl. Phys. Lett. 1973. Vol. 22. P. 527.

8. Ландсберг Г. С. Оптика. М. Наука, 1976.

9. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. М.: Мир, 1984.

10. Таблицы спектральных линий / А. Н. Зайдель, В. К. Прокофьев, С. М. Райский, Е. Я. Шрейдер. М.: ГИ Физматлит, 1962.

D. S. Agafonova

IMPROVEMENT OF FIBER-OPTIC SPARK SENSOR BY USING SPECTRAL RADIATION CONVERSION

Mathematical modeling of luminescent coating efficiency for silica fiber sensors is presented. The results of calculations shows increase of sensitivity. Sensitization occurs by increasing of the share captured radiation and the reduction of losses in an optical path through the spectral transformation of the propagating radiation.

Fiber-optic spark sensor, luminescence, rhodamine 6G, light scattering

УДК 544.77: 544.72.

В. С. Левицкий, А. И. Максимов, С. Ю. Землякова

ИССЛЕДОВАНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ-ТЕХНОЛОГИИ, В СИСТЕМЕ Si-Co-O

Получены на стеклянных и кремниевых подложках пленочные образцы состава $x\text{SiO}_2 - (1-x)\text{CoO}$, где x меняется в пределах от 0.15 до 0.85. Структура поверхности пленок исследовалась с помощью атомно-силового микроскопа «НТ-МДТ ИНТЕГРА» в полуконтактном режиме. Разрешение такого метода соответствует радиусу закругления зонда порядка 10 нм. Обнаружено, что структура пленок, нанесенных центрифугированием, имеет две системы частиц с размерами 0.7 или 3...4 мкм и 100...200 нм. Наибольшей площадью удельной поверхности обладают составы при $0.5 < x < 0.85$.

Золь-гель-технология, атомно-силовая микроскопия, наноструктурированные пленки, удельная поверхность

Последние два десятилетия ознаменовались значительным интересом исследователей к созданию и исследованию наноматериалов и наноструктур. Материалы, содержащие в своей структуре наночастицы, обладают уникальными свойствами вследствие появления размерных эффектов, высокой удельной поверхности, что позволяет таким материалам проявлять высокую каталитическую активность. Каталитические системы на основе наноматериалов и наноструктур нашли применение в химическом катализе, производстве полупроводниковых наностержней, нановискеров и нанотрубок. Одними из наиболее перспективных материалов для создания электроники нового поколения являются углеродные материалы на основе углеродных нанотрубок (УНТ) и графена. Такие материалы применяются для создания тонкопленочных транзисторов (Thin Film Transistor – TFT) [1], [2], логических схем [3] и элементов памяти [4].

Каталитическими системами для формирования УНТ являются массивы каталитических наночастиц магнитных материалов, таких как Fe_2O_3 , NiO, CoO, с размером 10...30 нм, заключенных в химически инертную матрицу, предотвращающую агрегацию наночастиц

[5], [6]. Упорядоченные массивы каталитических наночастиц удается формировать методами золь-гель-технологии [7], [8], при использовании фотолитографии [1]–[6] и технологии нанопринтинга [6], а также методами электронной литографии [1]–[4], [6]. Наиболее простым и удобным из указанных методов формирования каталитических наноматериалов является золь-гель-технология [7]. При получении золь и наночастиц необходимого размера в рамках золь-гель-технологии могут быть использованы различные типы химических реакций (восстановления, окисления, двойного обмена, гидролиза). Также применяют методы физической конденсации (путем замены растворителя или путем пропускания паров какого-либо вещества в жидкости), а также различные электрические методы [6].

Формирование материалов в системе Si–Co–O. Исходными материалами для синтеза растворов-золей служили: $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$, в качестве растворителя (дисперсионной среды) обычно используются этиловый, пропиловый и бутиловый спирты [9], [10]. В работе авторами использовался бутиловый спирт ($\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$).

Расчет масс и объемов исходных компонентов проводится в соответствии с выбранным соотношением количества конечных веществ в получаемом композите. Оптимальное соотношение основных компонентов в исходном растворе обеспечивает быстрый частичный или полный гидролиз в нем с сохранением образующихся продуктов в виде золя. Синтез золь осуществляется смешиванием исходных компонентов при комнатной температуре.

Эксперименты проводились при различных составах системы Si–Co–O. В частности, для экспериментов были выбраны следующие составы: 85 % SiO_2 – 15 % CoO ; 70 % SiO_2 – 30 % CoO ; 50 % SiO_2 – 50 % CoO ; 30 % SiO_2 – 70 % CoO 15 % SiO_2 – 85 % CoO (цифрами обозначены молярные проценты содержания оксидной фазы в конечном композите). Следует отметить, что количество спирта выбирается исходя из условий формирования и концентрации растворов-золей.

Время выдержки раствора оказывает важное влияние на свойства получаемой пленки. Пленкообразующие свойства у золь начинают проявляться не сразу, а по мере структурирования жидкости. С течением времени раствор-золь структурируется и превращается в гель. Некоторые системы являются устойчивыми при комнатной температуре и для их перевода в гелеобразное состояние необходимо удалить растворитель.

Нанесение и формирование пленок. Пленочные структуры формировались с использованием центрифуги «SPIN–150» в течение 60 с при частотах вращения 5000 и 10 000 об/мин. После нанесения пленки производилась термообработка при 400 °С. В качестве подложки были выбраны стеклянные пластины и пластины кремния ориентации <111>. После центрифугирования была произведена температурная обработка при 400 °С в течение 20 мин. Все сформированные пленочные структуры исследованы методом атомно-силовой микроскопии.

Структура пленок в системе Si–Co–O. Все пленки, прошедшие термообработку, исследованы с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) «НТ-МДТ ИНТЕГРА ТЕРМА». Исследования образцов проводились в полуконтактном режиме, разрешение такого метода микроскопии соответствует радиусу закругления зонда – порядка 10 нм. Также метод атомно-силового микроскопии является одним из методов, позволяющих зафиксировать и проанализировать структуру поверхности композитов, содержащих высокоомные фазы [8], [10].

Типичная картина пленочной структуры, формирующейся после отжига, представлена на рис. 1 и 2. На рис. 1 приведена топография пленочного образца состава 15 % CoO – 85 % SiO₂, время выдержки раствора-золя 7 дней, подложка – стекло, масштаб микрофотографии 5×5 мкм. Видно, что по поверхности статистически равномерно распределены частицы размером 0.7 мкм. Предполагается, что формирование таких частиц в системе Si–Co–O связано с вытеснением фаз, содержащих кобальт, на поверхность пленки при формировании геля в процессе центрифугирования. Последующий отжиг закрепляет структуру пленки.

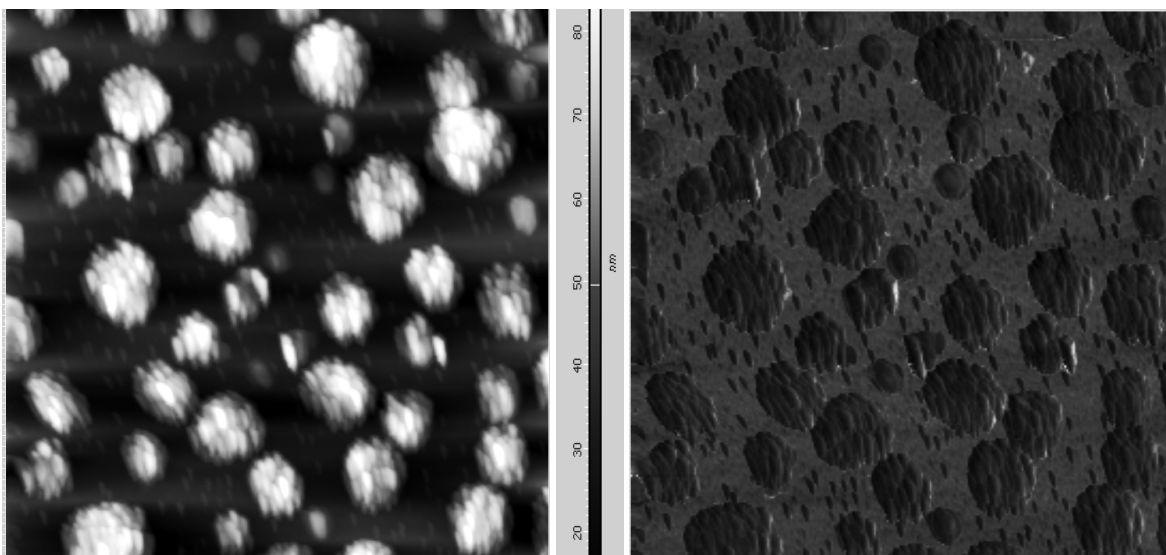


Рис. 1

Рис. 2

На рис. 2 представлено изображение в режиме фазового контраста образца, топология которого приведена на рис. 1. Из изображения на рис. 2 можно видеть, что на поверхность пленки вытесняются не только большие агрегаты с размером 0.7 мкм, но и более мелкие частицы с характерным размером 150 нм, которые равномерно распределены по поверхности, не занятой крупными частицами. Также на рис. 1 и 2 можно заметить, что агрегаты с размером 0.7 мкм состоят из некоторого количества мелких частиц. Вероятно, что при формировании золя происходит агрегация частиц с размером 150 нм в более крупные частицы.

Анализ атомно-силовой микроскопии всех полученных пленочных образцов показывает, что структура пленок, нанесенных центрифугированием, имеет две системы частиц с характерными размерами 100...200 нм и 0.7 мкм. Экспериментально было установлено, что при большой концентрации оксида кобальта в растворе-золе (70 и 85 % CoO) размер крупных агрегатов может достигать 3...4 мкм. В процессе исследования материал подложки (Si или стекло) не оказывает заметного влияния на размер формируемых наночастиц.

Структура пленок, нанесенных при разных скоростях вращения центрифуги, различается. Воспроизводимо формируются пленки при частоте вращения более 5000 об/мин, причем изменение частоты вращения центрифуги с 5000 до 10 000 об/мин не приводит к существенному изменению структуры пленки с точки зрения результатов атомно-силовой микроскопии.

Влияние времени выдержки раствора на структуру. Золи в исследуемой системе представляют собой неравновесную систему, развивающуюся во времени. При этом с течением времени изменяются размеры агломератов и их структура. Авторами были исследованы пленочные структуры, сформированные на разных стадиях развития процесса гелеобразования.

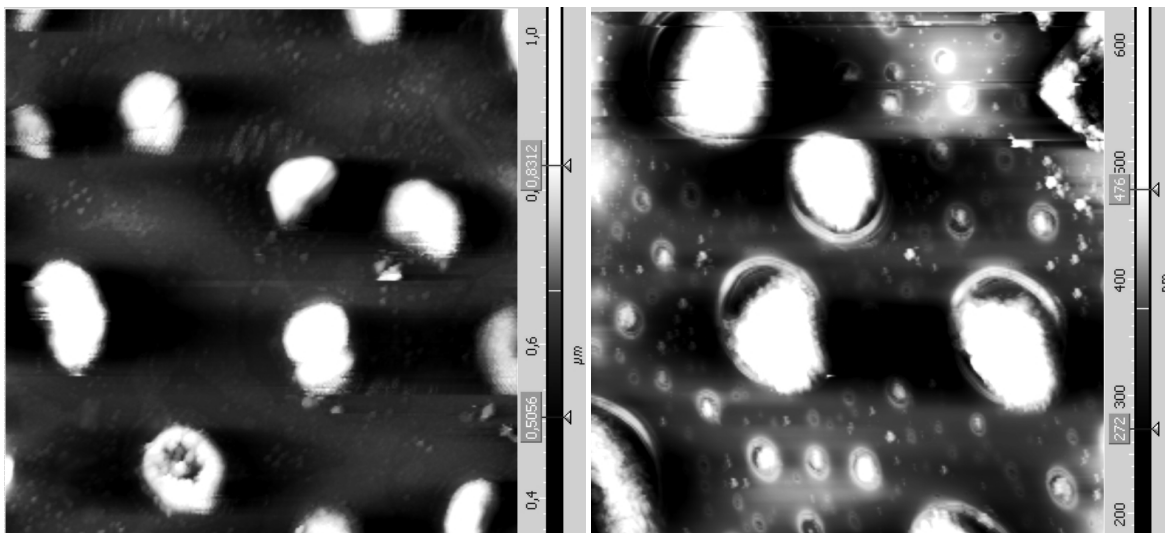


Рис. 3

Рис. 4

На рис. 3 приведена топография пленочного образца состава 70 % CoO – 30 % SiO₂, время выдержки раствора-золя 1 день, подложка – стекло, масштаб микрофотографии 20×20 мкм. На рис. 4 приведена топография пленочного образца состава 70 % CoO – 30 % SiO₂, время выдержки раствора-золя 7 дней, подложка – стекло, масштаб микрофотографии 20×20 мкм.

Из рисунков видно, что размеры агломератов с течением времени увеличились: на рис. 3 – размер маленьких частиц 150...200 нм; больших частиц, состоящих из маленьких, составил порядка 3 мкм; на рис. 4 – размер маленьких частиц 150...200 нм; больших частиц, состоящих из маленьких, составил порядка 4...4.5 мкм.

Следует отметить, что основная часть материала, который авторы связывают с фазой, содержащей Co, сосредоточена в больших образованиях, размер которых 3 и 4...4.5 мкм. На рис. 4 заметно наличие небольших образований с размером 0.7 мкм. Присутствие таких частиц указывают на начальную стадию формирования агломератов с размером порядка 4...4.5 мкм.

Исследование крупных агломератов с помощью АСМ в условиях высокого разрешения показало, что агломераты обладают сложной структурой. На рис. 5 и 6 представлены изображения типичных агломератов, находящихся на поверхности пленки. На рис. 5 приведена топография пленочного образца состава 70 % CoO – 30 % SiO₂, время выдержки раствора-золя 1 день, подложка – стекло, масштаб микрофотографии 5×5 мкм. На рис. 6 приведена топография пленочного образца состава 50 % CoO – 50 % SiO₂, время выдержки раствора-золя 7 дней, подложка – стекло, масштаб микрофотографии 1×1 мкм. Детальный анализ пленки вне частиц и больших агломератов указывает на наличие в оставшейся части пор с размером менее 10 нм. Отсутствие четко выраженных углублений на приведенной на рис. 7 микрофотографии связано с невозможностью их регистрации зондом, радиус закругления которого составляет 10 нм.

На рис. 7 изображена микрофотография пленки вне частиц и больших агломератов. Окружностями выделены участки, которые могут быть интерпретированы как поры.

Исследования удельной поверхности материалов в системе CoO–SiO₂. Специально для исследования удельной поверхности были приготовлены порошки гелей в системе CoO–SiO₂. Исследование материалов проводилось с помощью приборов серии «Sorbi».

Прибор может применяться как средство контроля текстурных характеристик дисперсных и пористых материалов. В качестве газа-адсорбата использовался азот. Измерение адсорбированных объемов газа-адсорбата проводится методом термодесорбции (4 значения адсорбции, соответствующие 4 относительным парциальным давлениям газа-адсорбата), расчет удельной поверхности в настоящее время проводится по методу БЭТ (Брунауэр–Эммет–Теллер). Для работы с прибором используется специализированное программное обеспечение SoftSorbi-II, позволяющее представлять процессы измерений в графическом виде в реальном масштабе времени. Градуировка прибора производится по государственным стандартным образцам удельной поверхности и по заданному объему газа [9]. Состав газовой смеси, прошедшей через ампулу с пробой образца, регистрируется детектором, снабженным схемой управления и термостабилизации.

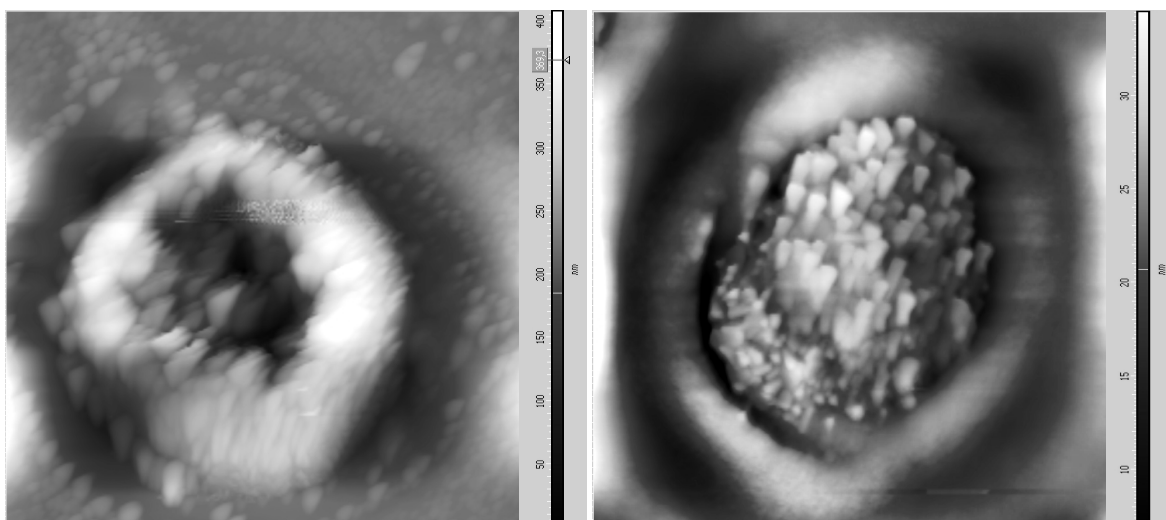


Рис. 5

Рис. 6

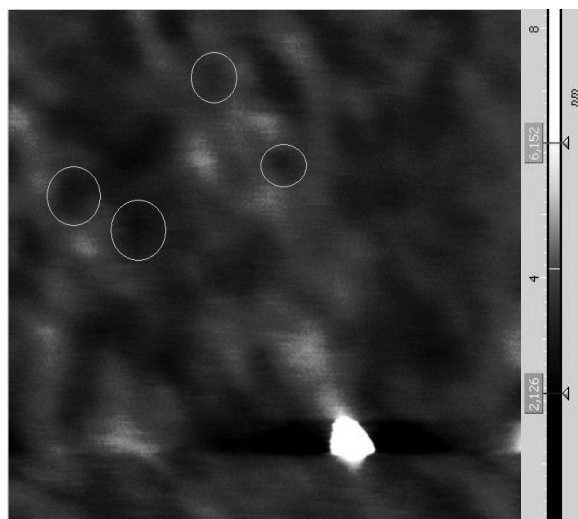


Рис. 7

Методика подготовки образцов. Порошковые образцы были приготовлены из растворов-золей такого же состава, что и исследованные пленки, путем перевода растворов в гели с последующей термообработкой. Термическая обработка полученных гелей проводилась при температурах 400 и 600 °С. Затем образцы исследовались с помощью прибора «Sorbi». Результаты измерения удельной поверхности и параметры исследованных образцов представлены на рис. 8.

Перед началом исследования был произведен прогрев каждого образца при температуре 150 °С в течение 60 мин в атмосфере инертного газа (гелий), для того чтобы избавиться образец от воды, которую он мог адсорбировать из воздуха. О наличии воды в образце свидетельствует изменение его окраски после процесса подготовки в инертной атмосфере. Результаты изменения массы порошка после термообработки, удаляющей адсорбированную влагу, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Образец (отжиг при 400 °С)	$m_{\text{холл}}, \text{Г}$	$m_{\text{гор}}, \text{Г}$	% потери массы
15 % CoO – 85 % SiO ₂	0.13	0.11	15.04
30 % CoO – 70 % SiO ₂	0.29	0.26	8.71
50 % CoO – 50 % SiO ₂	0.27	0.24	14.47
70 % CoO – 30 % SiO ₂	0.27	0.23	18.06
85 % CoO – 15 % SiO ₂	0.29	0.25	16.27

Результаты экспериментов представляются в виде кривых адсорбции и десорбции газа-адсорбата (азота) в условиях различных концентраций. По этим кривым вычисляется удельная площадь поверхности, усредненная по результатам четырех измерений, при различных давлениях газа-адсорбата для каждого образца. На рис. 8 приведена зависимость изменения удельной поверхности от состава и температуры отжига.

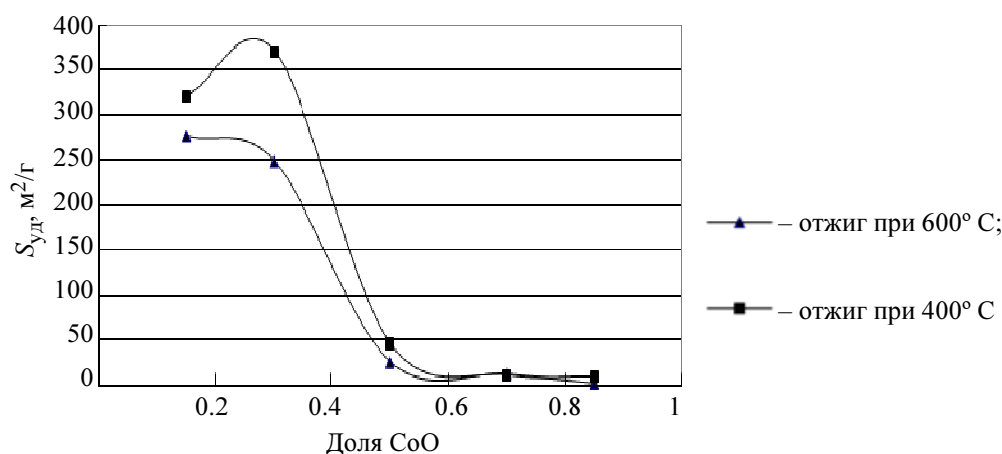


Рис. 8

Как видно из рис. 8, удельная площадь поверхности резко уменьшается при изменении состава системы от 35 % CoO – 65 % SiO₂ к 50 % CoO – 50 % SiO₂. Также видно, что в большинстве образцов после высокотемпературного отжига при 600 °С удельная площадь поверхности уменьшилась. Это уменьшение прогнозируемо, и его можно интерпретировать как увеличение размеров агломератов в неравновесных наносистемах. Наиболее заметные изменения характерны для диапазона составов от 0 до 50 % CoO.

По результатам измерения удельной площади поверхности, в предположении, что частицы однородны и имеют сферическую форму, был произведен оценочный расчет диаметра агломератов и их количества в образце. При расчете использовались данные о плотностях CoO и SiO₂, которые составляют 6.45 и 2.65 г/см³. Результаты расчета диаметра и количества агломератов представлены в табл. 2 и 3 (после отжига при температурах 400 и 600 °С соответственно).

Таблица 2

Образец	Средняя плотность частиц, г/см ³	D , м	N , шт.
15 % CoO – 85 % SiO ₂	3.22	$5.78 \cdot 10^{-09}$	$3.46 \cdot 10^{+17}$
30 % CoO – 70 % SiO ₂	3.79	$4.27 \cdot 10^{-09}$	$5.10 \cdot 10^{+17}$
50 % CoO – 50 % SiO ₂	4.55	$2.86 \cdot 10^{-08}$	$4.17 \cdot 10^{+15}$
70 % CoO – 30 % SiO ₂	5.31	$1.02 \cdot 10^{-07}$	$7.57 \cdot 10^{+13}$
85 % CoO – 15 % SiO ₂	5.88	$1.11 \cdot 10^{-07}$	$5.97 \cdot 10^{+13}$

Таблица 3

Образец	Средняя плотность частиц, г/см ³	D , м	N , шт.
15 % CoO – 85 % SiO ₂	3.22	$6.72 \cdot 10^{-09}$	$2.01 \cdot 10^{+17}$
30 % CoO – 70 % SiO ₂	3.79	$6.36 \cdot 10^{-09}$	$1.54 \cdot 10^{+17}$
50 % CoO – 50 % SiO ₂	4.55	$5.14 \cdot 10^{-08}$	$5.98 \cdot 10^{+14}$
70 % CoO – 30 % SiO ₂	5.31	$8.93 \cdot 10^{-08}$	$8.71 \cdot 10^{+13}$
85 % CoO – 15 % SiO ₂	5.88	$4.96 \cdot 10^{-07}$	$4.17 \cdot 10^{+11}$

Из представленных в табл. 2 и 3 данных видно, что с увеличением концентрации оксида кобальта происходит изменение размеров агломератов в сторону их увеличения. Термообработка образцов приводит к разрастанию наночастиц при повышенных температурах, причем увеличение концентрации оксида кобальта в системе сопровождается увеличением размеров наночастиц.

Результаты атомно-силовой микроскопии и измерения удельной площади поверхности показывают, что при малых концентрациях оксида кобальта в композите структура композита определяется в основном кремниевой составляющей. Вклад оксида кобальта в удельную поверхность мал, а высокая удельная площадь поверхности является следствием наличия аморфного пористого диоксида кремния, который наиболее часто формируется в результате золь-гель-процессов. Когда диоксид кремния образует гель – образуется пространственная сетка, в основном состоящая из связей Si–O–Si. В процессе отжига на поверхность пленки вытесняется фаза, содержащая кобальтовые частицы, которые наблюдаются на микрофотографиях, полученных с помощью АСМ. Также установлено, что пленочные образцы имеют две системы частиц, причем большие агломераты состоят из маленьких частиц.

При больших концентрациях кобальта в растворе образуются агломераты, а пространственная сетка практически не образуется, так как цепь Si–O–Co завершается ионом кобальта. Образуются фрактальные структуры в растворе, которые в процессе отжига изменяют свои размеры и превращаются в частицы с характерным диаметром 150 нм. Сравнение результатов исследования адсорбции азота с результатами атомно-силовой микроскопии показывает, что в исследованных системах существуют частицы (или поры), вносящие дополнительный вклад в площадь поверхности, которые с помощью атомно-силовой микроскопии не удается зафиксировать.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (2009–2013 гг.), ГК П399, П2279.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tans S. J., Verschueren A. R. M., Dekker C. Room-Temperature Transistor Based on a Single Carbon Nanotube // Nature. 1998. Vol. 393. P. 49–52.

2. Javey A., Kong J. Carbon Nanotube Electronics. New York: Springer, 2009. P. 267.
3. Carbon nanotube transistor arrays for multistage complementary logic and ring oscillators / A. Javey, Q. Wang, A. Ural et al. // Nano Letters. 2002. Vol. 2, № 9. P. 929–932.
4. Memory effects based on random networks of single-walled carbon nanotubes / K. W. Lee, K. Y. Heo, K. M. Kim, H. J. Kim // Nanotechnology. 2009. Vol. 20. P. 1–6.
5. Способы получения упорядоченных углеродных нанотрубок и нановолокон методом химического осаждения из пара / И. В. Золотухин, Ю. Е. Калинин, А. В. Ситников, А. Е. Ушакова // Междунар. науч. журн. «Альтернативная энергетика и экология». 2006. Вып. 10. С. 45–51.
6. Раков Э. Г. Пиролитический синтез углеродных нанотрубок и нановолокон // Рос. хим. журн. (журн. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева). 2004. Т. XLVIII, № 5. С. 12–20.
7. Основы золь-гель-технологии нанокомпозитов / А. И. Максимов, В. А. Мошников, Ю. М. Таиров, О. А. Шилова. 2-е изд. СПб.: ООО «Техномедиа» / Элмор», 2008.
8. Землякова С. Ю. Особенности формирования нанообъектов из жидкой фазы с помощью атомно-силовой микроскопии // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Физика твердого тела и электроника. 2010. № 8. С. 23–26.
9. Леньшин А. С., Мараева Е. В. Исследование удельной поверхности перспективных пористых материалов и наноструктур методом тепловой десорбции азота // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Физика твердого тела и электроника. 2011. № 6. С. 9–16.
10. Грачева И. Е., Максимов А. И., Мошников В. А. Анализ особенностей строения фрактальных нанокомпозитов на основе диоксида олова методами атомно-силовой микроскопии и рентгеновского фазового анализа // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009. Вып. 10. С. 16–23.

V. S. Levitckii, A. I. Maximov, S. Yu. Semlyakova

*INVESTIGATION OF CATALYTIC MATERIALS PREPARED BY SOL-GEL TECHNOLOGY
IN THE SYSTEM Si–Co–O*

In this work were obtained film samples on glass and silicon substrates. Films were prepared by sol-gel method and consisted of $x\text{SiO}_2-(1-x)\text{CoO}$, where x varies from 0.15 to 0.85. The surface structure of the films was investigated by atomic force microscopy. The AFM-study was carried out in tapping mode, the resolution of this method is about 10 nm. It was found the films structure has two systems of particles with sizes of 0.7 or 3 – 4 microns and 100 – 200 nm. We analyzed the specific surface area by nitrogen adsorption for different compositions. The highest specific surface area have compositions with $0.5 < x < 0.85$.

Sol-gel technology, atomic force microscopy, nano-structured film, surface area



УДК 681.5.017:66.08.012-52

С. Е. Абрамкин, С. Е. Душин, К. А. Поляшова

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕПЛООБМЕННОГО ПРОЦЕССА В ИСПАРИТЕЛЕ

Представлены математическая модель (ММ) управляемого технологического процесса регенерации абсорбента и результаты компьютерного моделирования.

Математическая модель, управляемый процесс, испаритель, ректификационная колонна, теплообмен, дымовые газы, абсорбция, десорбция

В химической, нефтяной и газовой промышленности для получения чистых продуктов применяются процессы выпаривания. В частности, в газовой промышленности в технологическом процессе абсорбционной осушки природного газа используется блок огневой регенерации, в котором происходит подготовка абсорбента к повторному использованию. Блок огневой регенерации состоит из следующих технологических аппаратов: ректификационной колонны, испарителя, буферной емкости (теплообменник типа «труба в трубе») и дымовой трубы. Эти технологические аппараты входят в систему «ДЕСОРБЦИЯ абсорбента». Технологические схемы системы «ДЕСОРБЦИЯ абсорбента», на основе которых разрабатываются ММ замкнутого комплекса систем «АБСОРБЦИЯ-ДЕСОРБЦИЯ», приведены в [1]. Модели массообменного процесса, происходящего в абсорбционной колонне, были рассмотрены в работах [2], [3].

Устройство испарителя, для которого требуется получить ММ управляемого теплообменного процесса, представлено на рис. 1. Выбор испарителя в качестве объекта управления обусловлен тем, что в системе «ДЕСОРБЦИЯ абсорбента» нет возможности напрямую управлять тепловыми процессами в ректификационной колонне. К топочной трубе испарителя подсоединяется газовая горелка, при помощи которой происходит управление тепловыми процессами в аппарате. В топочную трубу испарителя подается пламя от газовой горелки, которое нагревает трубное пространство, и в результате нагрева образуются дымовые газы, поступающие затем в жаровые трубы. Далее дымовые газы через дымовую трубу отводятся в атмосферу. В межтрубное пространство испарителя из насадочной секции ректификационной колонны стекает частично регенерированный абсорбент. Дымовые газы нагревают стенки жаровых труб. В свою очередь за счет отдачи тепла от стенок жаровых труб абсорбент нагревается до заданной температуры. В результате нагревания аб-

сорбента из него испаряется вода. Как видно из рис. 1, в устройстве используется противоточная схема теплообмена, так как абсорбент течет в одном направлении, а дымовые газы – в противоположном.

При построении динамической ММ испарителя учитывались следующие допущения:

- продольное перемешивание в каждом из потоков теплоносителей отсутствует, т. е. физические среды в аппарате движутся в режиме идеального вытеснения;
- поперечное перемешивание в потоках теплоносителей считается идеальным. Это предположение позволяет разрабатывать одномерную ММ, в которой учитывается изменение температуры только по длине аппарата;
- термическое сопротивление стенок теплообменника сравнительно мало. Выполнение этого условия означает, что температура стенки $\theta_{ст}(x, t)$, разделяющей теплоносители, постоянна по толщине стенки.

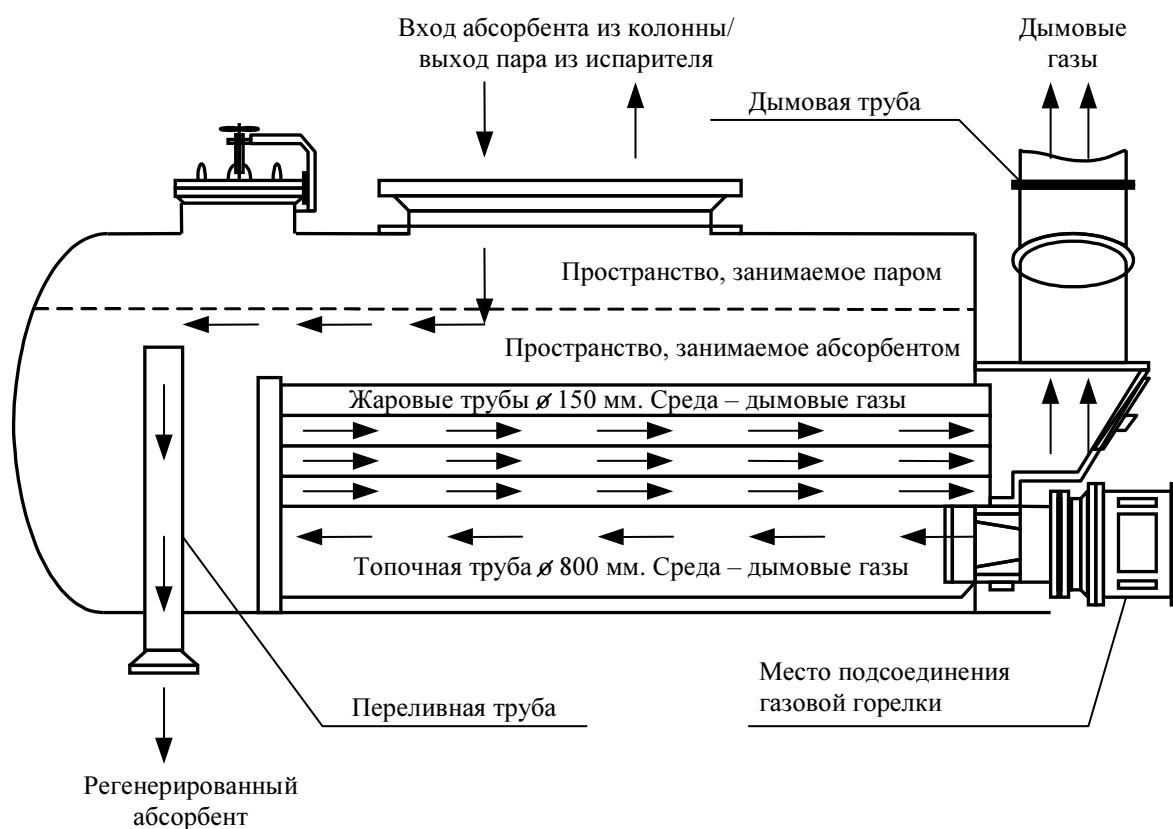


Рис. 1

Принимая во внимание эти допущения, была получена модель с распределенными параметрами в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка, описывающая нестационарный теплообмен в испарителе с учетом стенки жаровой трубы, разделяющей теплоносители:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_{д.г}}{\partial t} &= -v_{д.г} \frac{\partial \theta_{д.г}}{\partial x} - R_{д.г} (\theta_{д.г} - \theta_{ст}); \quad \frac{\partial \theta_a}{\partial t} = v_a \frac{\partial \theta_a}{\partial x} + R_a (\theta_{ст} - \theta_a); \\ \frac{\partial \theta_{ст}}{\partial t} &= R_{дгст} (\theta_{д.г} - \theta_{ст}) - R_{аст} (\theta_{ст} - \theta_a), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\theta_{д.г}, \theta_a, \theta_{ст}$ – температуры дымовых газов, абсорбента и стенки; $v_{д.г}, v_a$ – скорости дымовых газов и абсорбента; $R_{д.г}, R_a, R_{д.гст}, R_{аст}$ – физико-технологические коэффициенты, зависящие от физических свойств дымовых газов, абсорбента и материала стенки жаровой трубы.

Для ММ (1) были определены начальные распределения температур теплоносителей и граничные условия, характеризующие исследуемый процесс.

Начальные распределения температур теплоносителей:

$$\theta_{д.г0}(x) = \theta_{д.г}(x, t)|_{t=0}, \quad \theta_{a0}(x) = \theta_a(x, t)|_{t=0}.$$

Граничные условия:

$$\theta_{д.г}(x, t)|_{x=l} = \theta_{д.г}^{BX}(t), \quad \theta_a(x, t)|_{x=0} = \theta_a^{BX}(t).$$

Численное моделирование процессов в соответствии с (1) и начальными и граничными условиями производилось программными средствами MATLAB/Simulink. Для этого был осуществлен переход к дискретно-непрерывной ММ:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_{д.гi}}{dt} &= -\left(\frac{v_{д.г}}{h} + R_{д.г}\right)\theta_{д.гi} + R_{д.г}\theta_{стi} + \frac{v_{д.г}}{h}\theta_{д.гi-1}; \quad \frac{d\theta_{ai}}{dt} = -\left(\frac{v_a}{h} + R_a\right)\theta_{ai} + R_a\theta_{стi} + \frac{v_a}{h}\theta_{ai-1}; \\ \frac{d\theta_{стi}}{dt} &= R_{д.гст}(\theta_{д.гi} - \theta_{стi}) - R_{аст}(\theta_{стi} - \theta_{ai}), \\ &0 \leq i \leq 4, \end{aligned}$$

где h – шаг дискретизации по оси x .

При компьютерном моделировании «распределенность» вдоль пространственной оси x была сосредоточена в четырех точках (сечениях). Такое количество точек обусловлено тем, что при их меньшем числе возникает погрешность в результатах, при большем – заметного улучшения результатов не происходит. На рис. 2 представлены графики переходных процессов для каждого компонента ММ (a – дымовые газы, b – стенка, c – абсорбент) в четырех точках длины корпуса испарителя. Результаты компьютерного моделирования теплообменных процессов в испарителе приведены для случая подачи к абсорбенту ступенчатого температурного возмущения -5 К в отсутствие регулирования. В качестве абсорбента был выбран диэтиленгликоль, применяемый на газовых промыслах Крайнего Севера для осушки природного газа. Из графиков видно, что температура абсорбента недопустимо уменьшилась, так как температура дымовых газов теперь не достигает значения, необходимого для нагрева абсорбента до 436 К. Уменьшение температуры абсорбента является неблагоприятным фактором, так как для получения необходимой концентрации абсорбента необходимо, чтобы его температура была в пределах 433...436 К.

Решение данной проблемы потребовало разработки нелинейной ММ управляемого теплообменного процесса в испарителе:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_{д.г}}{\partial t} &= -f(u) \frac{\partial \theta_{д.г}}{\partial x} - R_{д.г}(\theta_{д.г} - \theta_{ст}); \quad \frac{\partial \theta_a}{\partial t} = v_a \frac{\partial \theta_a}{\partial x} + R_a(\theta_{ст} - \theta_a); \\ \frac{\partial \theta_{ст}}{\partial t} &= R_{д.гст}(\theta_{д.г} - \theta_{ст}) - R_{аст}(\theta_{ст} - \theta_a), \\ f(u) &= G_{т.г}, \end{aligned}$$

где $G_{т.г}$ – управляемый расход топливного газа.

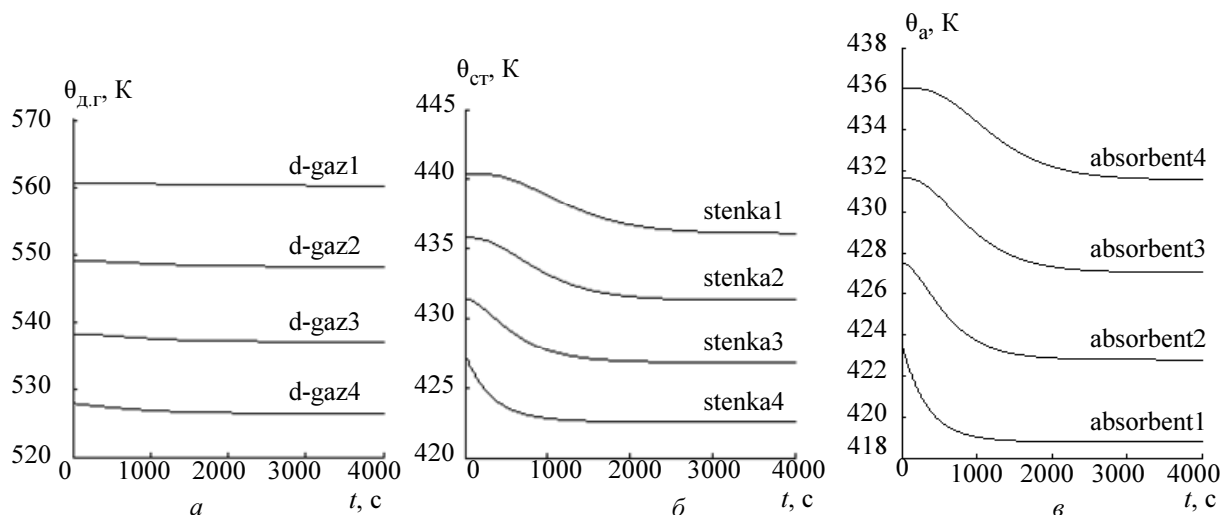


Рис. 2

На рис. 3 представлены графики (*а* – дымовые газы, *б* – стенка, *в* – абсорбент), полученные в результате компьютерного моделирования управляемых теплообменных процессов в тех же четырех точках длины. В данном случае применено управление подачей топливного газа в топочную трубу испарителя, вызванное уменьшением температуры абсорбента на входе в испаритель на 5 К.

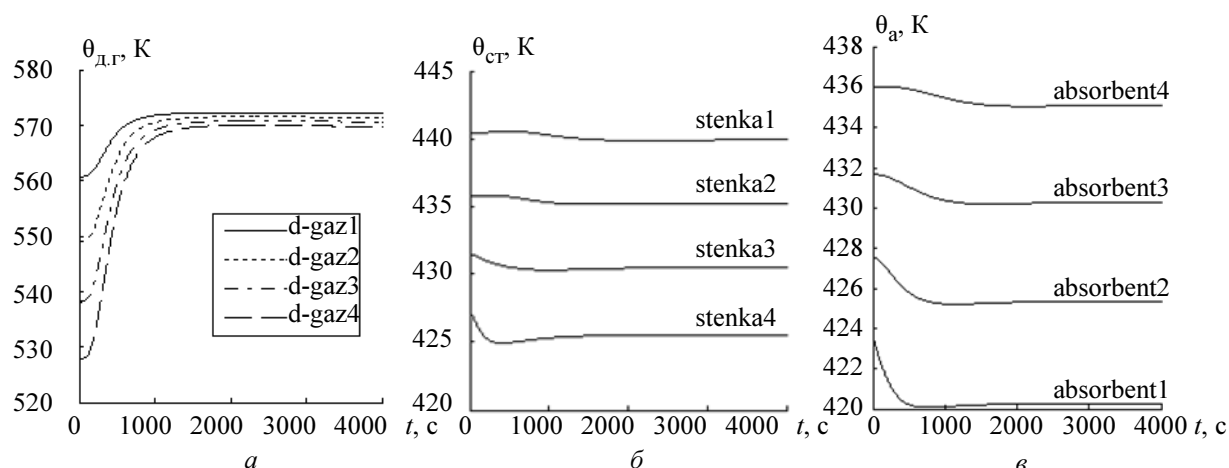


Рис. 3

Сравнивая графики переходных процессов на рис. 2 и 3, можно увидеть, что при применении управления температура абсорбента достигает определенного значения, лежащего в заданном интервале 433...436 К, и устанавливается в этом значении.

Управляемый теплообменный процесс в испарителе, как показали результаты моделирования, позволяет поддерживать температурный режим и концентрацию абсорбента на заданном уровне. Решение данной задачи является конечной целью технологического процесса в системе «ДЕСОРБЦИЯ абсорбента».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамкин С. Е. Анализ технологического процесса абсорбционной осушки газа как объекта управления // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2007. Вып. 3. С. 24 – 31.
2. Абрамкин С. Е., Душин С. Е. Разработка динамической математической модели процесса абсорбции в системе «газ-жидкость» // Системный синтез и прикладная синергетика: Сб. докл. Междунар. науч. конф., 29.09 – 02.10.2009. Пятигорск: РИА на КМВ, 2009. С. 208 – 212.

3. Абрамкин С. Е., Душин С. Е. Математическая модель массотеплообменных процессов технологического комплекса абсорбционной осушки газа //Мат-лы 6-й науч. конф. «Управление и информационные технологии» (УИТ-2010), СПб., 2010 / ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»». СПб., 2010. С. 220–224.

S. E. Abramkin, S. E. Dushin, K. A. Polyashova

MATHEMATICAL MODEL OF THE CONTROLLED HEAT EXCHANGE PROCESS IN THE EVAPORATOR

The mathematical model of the controlled technological process of the absorbent regeneration is described. The charts show the results of the computer simulation.

Mathematical model, controlled process, evaporator, rectifying column, heat exchange, smoke fumes, absorption, desorption

УДК: 20.53.19, 28.23.13

И. А. Голубев

РАЗВЕРТЫВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ В ОБЛАЧНОЙ СРЕДЕ

Рассматриваются существующие проблемы построения распределенных систем анализа данных. Приводится обзор применяемых методов сокращения вычислительной сложности аналитических задач. Рассмотрены проблемы, возникающие при развертывании корпоративных приложений в облачной среде. Предложена архитектура распределенной системы анализа данных на основе технологии облачных вычислений.

Аналитические системы, облачные вычисления, интеллектуальный анализ данных, распределенные системы

В настоящее время функционирование предприятия неизбежно связано с процессом накопления и анализа данных, поскольку сопровождается записью многих подробностей его деятельности. С конца 80-х гг. для целей анализа данных применяются методы data mining [1].

подавляющее большинство исследований в области анализа данных за последние 30 лет было направлено на создание более эффективных алгоритмов поиска нетривиальных шаблонов в данных [2]. При этом исследователь оперировал с данными, которые целиком размещены в основной памяти [3]. Это привело к тому, что разработанные алгоритмы имеют высокую точность распознавания, но недостаточно приспособлены к ресурсоемким задачам, которые возникают при работе со сверхбольшими (Tbytes) массивами данных: проблема big data [4].

Современные направления области data mining пытаются решить проблему объединения решений от нескольких обрабатывающих узлов, а не только задачу улучшения математических алгоритмов для распознавания образов. Данные разработки представлены в следующих областях знания:

- сети радиочастотной идентификации (RFID networks);
- социальные сети;
- визуальный data mining: идентификация объектов, видео-, аудио- и 3D-сканирование;
- облачные вычисления.

Облачные вычисления, позволяющие гибко масштабировать ресурсы под динамически изменяющиеся потребности аналитических задач, составляют основной предмет данной статьи. Вместе с тем существуют и другие методы сокращения размерности задач:

1. Предобработка данных с целью сокращения выборки.
2. Выбор представительной выборки для обучения.
3. Алгоритмы с пошаговым обучением (с возможностью дообучения).
4. Методы коллективного распознавания [5].
5. Распределенная обработка данных.

Перечисленные методы можно разделить следующим образом: 1–4 – масштабирование за счет применяемых алгоритмов, 5 – масштабирование за счет увеличения доступных ресурсов. Рассмотрим каждый из указанных методов, начав с первой группы.

Первое, что необходимо выполнить для сокращения размерности задачи – рассмотреть характеристики самих данных. Исключаются неинформативные атрибуты – идентификаторы, даты, константы и т. д. Текстовые данные, вещественные числа отображаются на натуральные числа. Входные данные, содержащие множество нулей, загружаются в разреженные структуры данных (пример реализации – в библиотеке Weka [3]).

Подбор представительной выборки позволяет построить модель с точностью, превышающей 90 %. Примером¹ может служить алгоритм Naïve Bayes. Дело в том, что при построении графика точности модели как функции от объема данных обучения кривая перестает расти после обработки определенного объема данных и при дальнейшем обучении точность может даже понизиться [3].

По своей архитектуре большинство классификаторов пакетно-обучаемы, т. е. они обучаются на всей выборке данных сразу, что не критично в случаях, когда все данные помещаются в памяти. Однако для более ресурсоемких вычислений стоит применять алгоритмы, способные обновлять свою модель в ходе вычислений, т. е. дообучаться.

Многие алгоритмы машинного обучения способны обучаться пошагово, по мере поступления новых данных. Как правило, такие алгоритмы имеют линейную вычислительную сложность $O(n)$ и требуют лишь наличия обрабатываемой подвыборки в памяти, а благодаря способности обучаться поэтапно модель можно использовать в любой момент: текущее состояние сохраняется, а процесс обучения затем может быть продолжен в будущем.

Еще один подход к решению проблемы «больших данных» – использование коллективного распознавания. К таким методам прибегают ввиду специфичности исследуемой задачи:

- 1) данные для распознавания собираются множеством распределенных сенсоров;
- 2) разнородные источники данных (целочисленные, непрерывные, текстовые типы данных, изображения, звуковая информация);
- 3) решаемая задача обладает большой размерностью.

В свете изложенного, один из основных подходов к обработке больших массивов данных при обучении – разделить исходную выборку на подмножества, которые могут быть независимо умещены и обработаны в основной памяти. Для каждой из подвыборок можно натренировать и сохранить независимый классификатор. Этот процесс естественным образом, при необходимости, может быть распределен на несколько машин.

¹ В библиотеке Weka существуют фильтры предобработки данных, способные формировать выборку случайным образом (используя нормальное распределение) из потоковых данных, для которых мощность входного множества неизвестна заранее [6].

Полученный ансамбль классификаторов можно использовать для прогноза, объединяя предсказания от индивидуальных классификаторов. Простые схемы голосования (для классификации) или усреднения (вероятностей для классификации или предсказанных целевых значений для регрессии) работают в данном случае вполне приемлемо.

Рассмотрев алгоритмические способы масштабирования, перейдем к вопросам масштабируемости вычислительных ресурсов для анализа данных.

Несмотря на то, что каждый отдельно взятый среднестатистический компьютер имеет существенные ограничения по памяти, дисковому пространству, скорости процессора, низкая цена аппаратного обеспечения широкого распространения позволяет неограниченно дублировать узлы обработки. Это естественным образом приводит к мысли о возможности использования распределенных вычислений для ресурсоемких задач. В настоящее время экономически эффективнее установить 8 серверов с 8 ядрами и 128 Гбайт ОЗУ у каждого, чем приобрести одну систему с 64 процессорами и терабайтом ОЗУ [4].

Однако не каждая организация готова приобретать дорогостоящее оборудование для проведения распределенного анализа данных. Дело в том, что зачастую довольно сложно оценить потенциальные выгоды от извлеченных с помощью алгоритмов data mining знаний.

Модель облачных вычислений позволяет решить данную проблему взяв в аренду вычислительные ресурсы лишь на время решения задачи, без необходимости покупки оборудования и найма администраторов. Тем не менее, высококвалифицированные специалисты в областях data mining и распределенных систем понадобятся.

При использовании облачных вычислений появляется возможность динамически подстраивать программно-аппаратную архитектуру в зависимости от предъявляемых требований по качеству обслуживания (Quality of Service, QoS).

Некоторые крупные производители программного обеспечения уже предлагают свои аналитические решения, используя термин cloud computing. Например, команда разработчиков Oracle настроила и выложила в сеть образ виртуальной машины Amazon Machine Instance (AMI), который снабдила базой данных Oracle 11g Enterprise. СУБД Oracle, как известно, имеет встроенные средства для поиска шаблонов, связей в данных и прогнозирования. Имея доступ к базе данных можно выполнять аналитические запросы и выводить их в графический интерфейс Oracle Data Miner или визуализировать самостоятельно, используя программный интерфейс SQL/JavaAPI. Таким образом, аналитик запускает Oracle Data Mining AMI (посредством web-сервисов Amazon) и далее платит только за пользование сервисом AmazonEC2 [7].

Однако в данном случае не используется потенциал масштабируемости облачных ресурсов: традиционная Oracle 11g просто установлена на удаленной виртуальной машине, а все вычисления выполняются на одном узле.

Помимо Oracle компания Microsoft также предоставила пробную услугу по обработке данных в MSExcel 2007 [8], используя удаленную обработку в облаке. Достаточно установить расширение для Excel под названием «Table Analysis Tools for the Cloud» и открыть таблицу или CSV-файл для анализа. После этого Excel plugin соединяется с сервером Microsoft, загружает на него данные, выполняет анализ и затем высылает результат обратно аналитику. Сервис обладает возможностями анализа рыночных корзин, класси-

фикации, прогнозирования и обнаружения выбросов. Несмотря на наличие дружелюбного интерфейса, отсутствует возможность выбора алгоритмов анализа и их настройки. Несмотря на то, что не стоит требовать от тестового сервиса возможности настройки, в реальных приложениях эта функциональность крайне важна, так как результаты выполнения анализа к ним очень чувствительны.

Рассмотрим проблемы, которые возникают в связи с переносом аналитических приложений на облачную инфраструктуру.

Эволюция устройств хранения данных привела к тому, что программист, работая на настольном компьютере или используя ресурсы локального сервера или сервера в Центре обмена данными (ЦОД), ожидает получить:

- 1) безграничные объемы медленной дисковой памяти;
- 2) как файловое хранение данных, так и базы данных.

При переносе приложений в облачную среду эти допущения в некоторой степени нарушаются. Несмотря на то, что есть возможность хранить терабайты в cloud, необходимо дорого платить за перенос и хранение данных. По расценкам Amazon необходимо оплатить \$ 100 за перенос каждого терабайта в облако, а также ежемесячно \$ 140 за само хранение данных (по состоянию на май 2011 г.)¹.

Кроме того, некоторые поставщики облачных платформ вводят искусственные ограничения. Например, Google App Engine не только не позволяет загрузить файл объемом более 10 Мбайт, но и не имеет платного способа обойти эту проблему. Поставщик Amazon не позволяет хранить файл объемом более 5 Гбайт. Указанные ограничения могут быть существенны для некоторых аналитических приложений, например работающих с графической информацией.

Что же касается реляционных баз данных, то неоднократно отмечалось, что они не пригодны для анализа сверхбольших выборок данных ввиду высоких накладных расходов при слиянии таблиц [2]. Именно по этой причине крупные поставщики облачных услуг, такие, как Amazon и Google, с самого начала запускали услуги хранения данных в ненормализованном виде – AmazonSimpleDB, GoogleBigTable.

Другая важная проблема в cloud computing – это информационная безопасность. Представители организаций с большой остороженностью относятся к идее передачи информации, составляющей интеллектуальную собственность, «на сторону» без четких гарантий необходимой защиты. Вместе с тем, остается открытым вопрос о том, где данные более сохранны – на локальных уязвимых пользовательских компьютерах или в ЦОДах поставщиков облачных услуг, оснащенных всеми необходимыми средствами обеспечения отказоустойчивости и информационной безопасности [9].

Адаптации облачной парадигмы на предприятиях должны помочь частные облака. Они не снимают с ИТ-подразделений нагрузки по развертыванию соответствующей инфраструктуры и управлению ею, но способствуют оптимизации использования ресурсов для приложений за счет виртуализации и масштабируемости.

¹ Amazon S3 pricing. <http://aws.amazon.com/s3/#pricing>

С другой стороны, размещение компонентов инфраструктуры предприятия в публичном облаке дает шанс получения средств аналитики, управления жизненным циклом и другого программного обеспечения для небольших производителей, которые не могут позволить себе затраты на сложную инфраструктуру.

Следующая проблема применения облачных вычислений: преимущества удаленной обработки больших объемов данных могут быть сведены на нет низкой пропускной способностью сетевых каналов. Это особенно актуально для российских предприятий, где высокоскоростные каналы во Всемирную сеть не всегда доступны. Данная проблема может быть отчасти или полностью решена с помощью частных или гибридных облаков. Последние представляют собой попытку объединить преимущества в безопасности от использования частных кластеров и экономии от аренды сторонних кластеров.

Надежность арендуемых ресурсов – другая важная проблема облачных вычислений. Отказ публичного облака Amazon 21 апреля 2011 г. показал необходимость продуманной организации собственной инфраструктуры в облаке с учетом необходимости перераспределения вычислительных процедур на другой регион в аварийных ситуациях. Основным выводом из происшедшего в том, что план аварийного восстановления – это обязанность самого клиента [10].

«Руководитель перспективных проектов АСКОН Олег Зыков уверен, что для перехода в «облака» необходимо, в первую очередь, провести серьезное, полноценное тестирование облачного сервиса» [9]. Цель тестирования заключается в том, чтобы понять, достаточно ли скорость и стабильность интернет-канала для комфортной работы с приложениями, а также определить, какие конфигурации ПО предоставляются поставщиком услуг, как осуществляется обмен данными между локальными компьютерами и облаком, какие средства защиты информации используются.

Рассмотрев различные особенности, связанные с использованием технологии облачных вычислений, перейдем к описанию архитектуры аналитического облачного решения, которое является востребованным для аналитиков, работающих с алгоритмами data mining. Предлагаемая система позволит использовать преимущества технологии облачных вычислений, а также существующие наработки в области распределенных систем для решения ресурсоемких задач анализа данных.

Исходя из проделанного обзора, можно сделать вывод о целесообразности комбинирования масштабируемости инфраструктуры и масштабируемости алгоритмов.

Рассмотрим архитектуру системы применительно к решению задачи классификации данных. Можно выделить 2 этапа работы системы: этап построения классификатора или модели и этап применения модели к тестовым данным.

Этап подготовки системы к работе: обучение распределенного классификатора. На этапе обучения предлагается использовать приведенные в обзоре методы работы с данными. Во-первых, используется знание о том, что представительной выборки из обучающих данных достаточно для построения классификатора. В связи с этим из обучающих данных берутся различные случайные выборки, которые рассылаются на узлы обработки. Узлы обработки независимо строят модели, после чего сообщают центральному узлу о своей готовности (рис. 1).

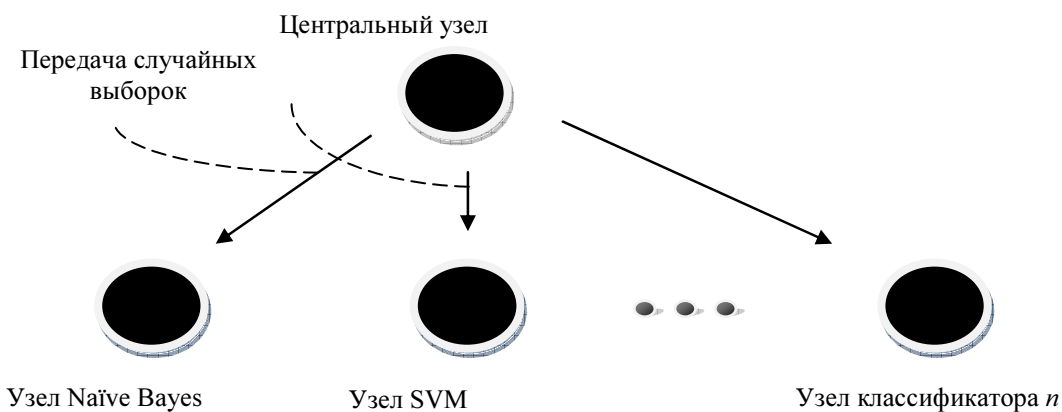


Рис. 1

Во-вторых, использование ансамбля классификаторов позволяет в среднем получить более высокую точность, чем при применении одного алгоритма. Поскольку создаваемая система является распределенной, необходимо использовать преимущество коллективного распознавания для повышения точности анализа.

В-третьих, в описываемой системе планируется использовать версии алгоритмов с возможностью инкрементального обучения, поскольку объемы обучающих данных могут превышать доступную оперативную память. Кроме того необходимо предусмотреть возможность дообучения моделей при поступлении уточняющих данных.

Этап применения модели к данным. На этапе, когда модели уже построены, необходимо использовать масштабируемость ресурсов, которую предоставляют распределенные системы.

Для динамического выделения вычислительных ресурсов создается пул машин в горячем резерве: несколько машин запущены заблаговременно. При задействовании одной из машин в качестве узла обработки автоматически запускается новая машина и добавляется в пул. Это позволяет использовать новые машины, не дожидаясь запуска, на который может уйти до нескольких минут.

Все узлы системы можно поделить на группы, в зависимости от типа используемой в рамках каждой группы модели. Например, узлы Naïve Bayes имеют эквивалентную модель и выполняют только байесовскую классификацию. На каждую группу узлов, в отличие от этапа подготовки системы, рассылаются одинаковые данные. На рис. 2 приведена архитектура системы на этапе применения модели.

Таким образом, анализ одних и тех же данных проводится различными алгоритмами для реализации подхода коллективного распознавания.

Узлы объединяются в группы с целью повышения производительности: данные, поступившие на группу, разделяются между узлами и обрабатываются параллельно.

Количество узлов в группе динамически изменяется в зависимости от нагрузки. Для этого берется машина из пула машин и на нее реплицируется требуемая модель. Модель загружается из специального хранилища моделей.

Система анализа данных, созданная в соответствии с описанной архитектурой, позволит использовать преимущества распределенных вычислений в облачной среде:

1) экономическое преимущество – аппаратура арендуется по требованию и только на время вычислений;

- 2) повышение производительности за счет распределенной одновременной обработки частей данных (параллелизм данных);
- 3) повышение точности за счет использования ансамбля моделей.

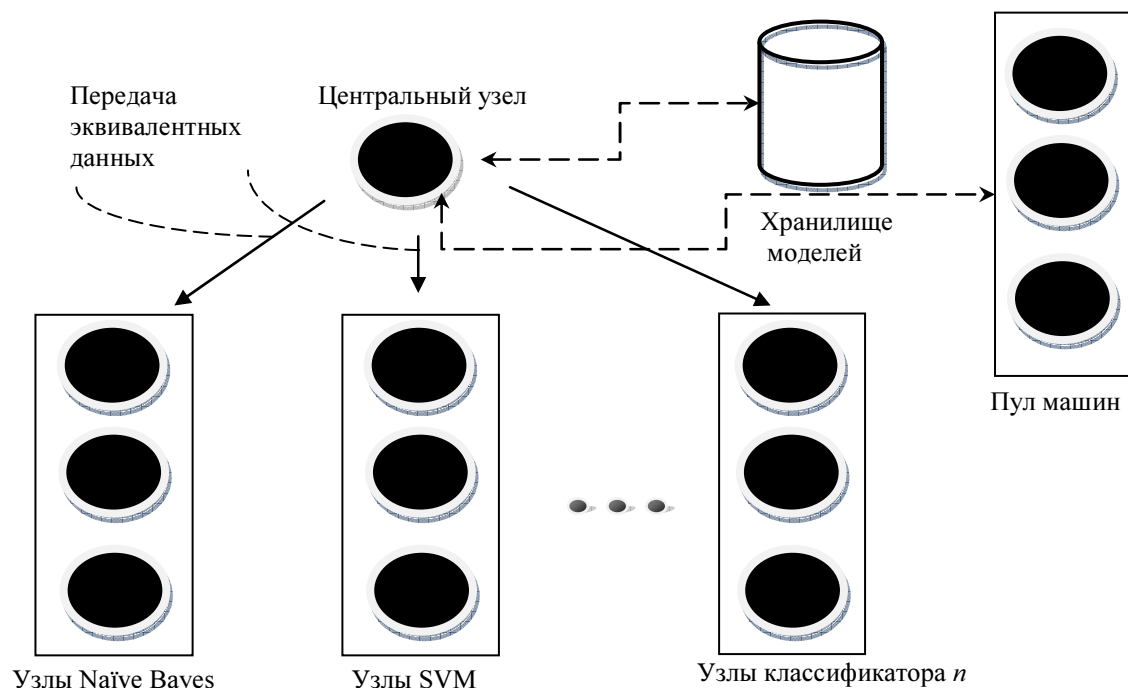


Рис. 2

Проведению исследования на предмет составления списка масштабируемых алгоритмов data mining принадлежит приоритет в ходе разработки данной предметной области.

Создание макета системы и проведение экспериментов с реальными данными позволит выявить многие другие существующие проблемы, возникающие при комплексном рассмотрении процесса создания облачной услуги анализа данных, а также описать методы и модели, применимые для их решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ данных и процессов/ М. С. Куприянов и др. 3-е изд. СПб.: БХВ, 2009.
2. Nisbet R. Handbook of Statistical Analysis and Data Mining Applications / R. Nisbet , J. Elder, G. Miner. Elsevier Inc.,2009.
3. Handling Large Data Sets with Weka [Электронный ресурс]/<http://wiki.pentaho.com/display/DATAMINING/Handling+Large+Data+Sets+with+Weka>
4. The Pathologies of Big Data [Электронный ресурс] /JacobsA.,1010dataInc., 2009./<http://queue.acm.org/detail.cfm?id=1563874>
5. Городецкий В. И., Серебряков С. В. Методы и алгоритмы коллективного распознавания: обзор. Труды СПИИРАН / РАН. С.-Петерб. ин-т информатики и автоматизации; Под общ. ред. Р. М. Юсупова. Вып. 3, т. 1. СПб.: Наука, 2006.
6. Bouckaert R. R. WEKA Manual for Version 3-6-4 / R. R. Bouckaert, E. Frank, M. Hall; University of Waikato, Hamilton, New Zealand, 2010.
7. Test drive Oracle Data Mining on the Cloud [Электронный ресурс] /<http://www.oracle.com/technetwork/database/options/odm/odm-education-101260.html>
8. SQL Server Data Mining in the Cloud Review [Электронный ресурс] /<http://sqlserverpedia.com/blog/uncategorized/sql-server-data-mining-in-the-cloud/>
9. PLM в облаках: задержка на старте [Электронный ресурс] /Дубова Н. «Открытые системы». № 02. 2011. <http://www.osp.ru/os/2011/02/13007692/>
10. Отказ «облака» Amazon: 10 уроков, которые нужно усвоить [Электронный ресурс] / http://www.crn.ru/news/detail.php?ID=51161&sphrase_id=56251

The article covers various arising issues of distributed data mining systems development. Existing best practices of computational complexity reduction are outlined. Challenges of launching corporate applications in cloud are reviewed. Architecture of cloud-based distributed data analysis system is proposed.

Analytical systems, cloud computing, data mining, distributed systems

УДК: 002.6:004.3; 002.6:022.9

З. А. Каршиев

ОБЗОР ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ ПОСТРОЕНИЯ ДЕРЕВЬЕВ РЕШЕНИЙ

Приведен обзор параллельных алгоритмов создания деревьев решений для больших наборов данных. Большинство подходов использует параллелизм данных путем распараллеливания работы по определению атрибутов разбиения узлов дерева и синхронное построение дерева в ширину (breadth-first). Некоторые подходы используют параллелизм задач, назначая процессору или группе процессоров задачу создания части дерева решений.

Интеллектуальный анализ данных, параллельные алгоритмы, классификация, деревья решений

В настоящее время в различных областях человеческой деятельности накоплено огромное количество информации о различных материальных и нематериальных сущностях, их свойствах, поведении и связях. Работа любого аналитика с набором понятий и сущностей всегда строится на использовании классификаций.

Классификация [1] – системное распределение изучаемых предметов, явлений, процессов по родам, видам, типам, по каким-либо существенным признакам для удобства их исследования; группировка исходных понятий и расположение их в определенном порядке, отражающем степень этого сходства.

Классификация является одной из важнейших задач *интеллектуального анализа данных (data mining)* [2]. Она применяется в маркетинге при оценке кредитоспособности заемщиков, определении лояльности клиентов, распознавании образов, медицинской диагностике и многих других приложениях. Если аналитику известны свойства объектов каждого класса, то при отнесении нового наблюдения к определенному классу данные свойства автоматически распространяются и на него.

Формально задачу классификации можно описать следующим образом: даны объекты для обучения (экземпляры или записи) и их атрибуты, а также категории или классы, к которым принадлежат эти объекты. Атрибуты каждой записи могут быть категориального или действительного типа. Далее строится классификатор, который использует обучающие данные, чтобы создать модель для прогнозирования класса новой записи, учитывая ее атрибуты.

Для классификации в *data mining* используется множество различных методов: нейронные сети, деревья решений, машины опорных векторов, метод *k*-ближайших соседей, алгоритмы покрытия и др., при построении которых применяется обучение с учителем, когда выходная переменная (метка класса) задана для каждого наблюдения. Формально классификация производится на основе разбиения пространства признаков на об-

ласти, в пределах каждой из которых многомерные векторы рассматриваются как идентичные. Иными словами, если объект попал в область пространства, ассоциированную с определенным классом, он к нему и относится.

Деревья решений имеют довольно высокую степень точности и кроме того легче интерпретируются человеком. Это является решающим преимуществом в выборе методов интеллектуального анализа данных. По этим причинам большинство работ по масштабированию алгоритмов классификации были посвящены разработке параллельных версий алгоритмов построения деревьев решений.

Деревья решений [2] – это способ представления правил в иерархической, последовательной структуре. Обычно каждый узел дерева включает проверку определенной независимой переменной (значения которых известны и на основании которых определяется значение зависимой переменной). Иногда в узле дерева две независимые переменные сравниваются друг с другом или определяется некоторая функция от одной или нескольких переменных. Если переменная, которая проверяется в узле, принимает категориальные значения, то каждому возможному значению соответствует ветвь, выходящая из узла дерева. Если значением переменной является число, то проверяется, больше или меньше это значение некоторой константы. Иногда область числовых значений разбивают на несколько интервалов. В этом случае выполняется проверка на попадание значения в один из интервалов.

Листья деревьев соответствуют значениям зависимой переменной, т. е. классам. Объект принадлежит определенному классу, если значения его независимых переменных удовлетворяют условиям, записанным в узлах дерева на пути от корня к листу, соответствующему этому классу. Если какая-либо независимая переменная классифицируемого объекта не имеет значения, то возникает проблема, связанная с неопределенностью пути, по которому необходимо двигаться по дереву. В некоторых случаях пропущенные значения можно заменять значениями по умолчанию. Если такой подход неприемлем, то необходимо предусмотреть специальные способы обработки таких ситуаций (например, перемещаться по ветви, которая ведет к большему количеству объектов из обучающей выборки). Другой вариант обработки может быть связан с добавлением специальной ветви к узлу для пропущенных значений.

SLIQ¹ [3] был одним из самых ранних (первых) масштабируемых алгоритмов построения классификаторов – деревьев решений. Он использует вертикальный формат данных, называемый списками атрибутов, который позволяет предварительно сортировать числовые атрибуты в начале, чтобы избежать повторной сортировки, требуемой в каждом узле в традиционных деревьях решений. Однако он использует резидентную память, называемую списком классов (class-list), которая растет (возрастает) линейно в зависимости от объема входных данных. Алгоритм SPRINT² [4] избавлен от этой проблемы. Он хранит классы как часть списков атрибутов и использует параллелизм данных и распределенную память. Распараллеливание алгоритма SLIQ следует аналогичной парадигме, за исключением использования списка классов.

Распараллеливание SLIQ усложняется в связи с использованием списка классов, который требует произвольного доступа (random access) и частого обновления (frequent updating). Параллельные алгоритмы, основанные на SLIQ, требуют, чтобы списки классов были сохранены в резидентной памяти. Это приводит к двум подходам к распараллеливанию SLIQ:

¹ SLIQ – Supervised Learning In Quest, где Quest – data mining проект в IBM Almaden Research Center.

² SPRINT – Scalable PaRallelizatable INndition of decision Trees.

- 1) тиражирование списка классов в локальную память каждого процессора;
- 2) распределение списка классов так, чтобы на каждом процессоре сохранялась только часть общего списка.

В SLIQ/R [4] (Replicated Class List) используется первый подход. Процесс разделения (на поддеревья) требует обновления списка классов после обработки каждого обучающего элемента. Так как на каждом процессоре сохраняется полный список классов, каждое обновление списка классов должно быть передано и использовано каждым процессором. Таким образом, время выполнения разделений будет увеличиваться в зависимости от размера обучающей выборки, если даже объем данных на каждом узле останется фиксированным. SLIQ/R может эффективно обрабатывать обучающие данные, только если список классов поместится в память каждого процессора независимо от числа используемых процессоров.

SLIQ/D [4] (Distributed Class List) помогает уменьшить используемую память в SLIQ распределив список классов по многопроцессорной системе, поэтому каждый процессор содержит только (P – количество процессоров) часть списка классов. Распределение списка классов не взаимосвязано с распределением действительных (числовых) списков атрибутов, метка класса, соответствующая значению атрибута, может находиться на другом процессоре. Это предполагает необходимость взаимодействия между процессорами для поиска «не-локальных» меток классов. Так как список классов создается из исходного разделенного набора обучающих данных, он будет взаимосвязан с категориальными списками атрибутов. Таким образом, взаимодействие между процессорами требуется только для действительных атрибутов. SLIQ/D имеет низкую производительность при вычислении действительных (числовых) точек распределения, поскольку при просмотре каждого списка атрибутов надо найти соответствующую метку класса и дерево-указатель (tree pointer) для каждого значения атрибута. Это означает, что каждому процессору понадобится взаимодействовать с $P - 1/P$ процессорами. Кроме того, каждому процессору придется обслуживать запросы других процессоров в середине просмотра своего списка атрибутов. Также в SLIQ/D существуют коммуникационные расходы на обновление списка классов при разделении данных с использованием найденной наилучшей точки разделения.

Таким образом, SLIQ/D лучше использует доступную память, а SLIQ/R предпочтительней с точки зрения производительности.

В SPRINT и параллельных версиях SLIQ списки атрибутов горизонтально распределены между процессорами. Деревья решений тоже тиражируются (копируются) по всем процессорам. Деревья строятся синхронно в ширину (breadth-first). Каждый процессор вычисляет лучшую точку разделения (расщепления), используя свои локальные списки атрибутов для всех узлов текущего уровня дерева. Взаимодействие между процессорами выполняется для определения лучшей точки разделения среди всех процессоров. Каждый процессор самостоятельно разделяет текущие узлы на новые дочерние элементы, используя лучшую точку разделения, и готовит почву для следующего уровня дерева. Поскольку горизонтальная запись разделена на несколько списков атрибутов, используется хеш-таблица, чтобы отследить, какая запись соответствует (принадлежит) какому дочернему элементу. Размер этой хеш-таблицы пропорционален числу записей в узле. Для верхних уровней дерева это число $O(N)$, где N – число записей в наборе обучаемых данных. Если хеш-таблица не помещается в оперативную память, то SPRINT должен разделить фазу разделения на не-

сколько этапов так, чтобы хеш-таблица для каждой из фаз помещалась в память. Для этого требуется несколько проходов по каждому из списков атрибутов, что приводит к большим расходам на операции запись/чтение на диск. SPRINT менее эффективно распараллеливает фазу разделения. Он строит необходимую хеш-таблицу на всех процессорах, собирая «идентификатор записи к узлу» (*record-id-to-node*) от всех процессоров. Для этой фазы накладные расходы каждого процессора равны $O(N)$. Кроме начальной фазы сортировки, последовательное время выполнения классификатора равно $O(N)$. Таким образом, SPRINT неэффективен с точки зрения времени выполнения. Он также неэффективен с точки зрения требований к памяти, так как для каждого процессора требуется память $O(N)$, а размер хеш-таблицы совпадает с размером обучающих данных верхнего уровня дерева решений, причем хеш-таблица имеется на каждом процессоре.

Алгоритм ScalParC (Scalable Parallel Classifier) [5] также является параллельным алгоритмом построения классификатора, основанным на списке атрибутов для машин с распределенной памятью. Он подобен SLIQ/D (за исключением использования для каждого узла хеш-таблицы вместо глобального списка классов). ScalParC использует новую распределенную хеш-таблицу для разделения (расщепления) узла, снижая коммуникационную сложность и требования к памяти в отличие от SPRINT, делая ее более масштабируемой для больших наборов данных. Предполагается, что хеш-функция h хеширует ключ k , чтобы получить пару чисел $h(k) = (p_i, l)$ (т. е. k хешируется к расположению l на локальной части хеш-таблицы, находящейся на процессоре p_i). Каждый ключ k связан со значением v . Хеш-таблица строится следующим образом. Сначала каждый процессор просматривает (сканирует) все его (k, v) -пары и хеширует k на каждой паре для определения места назначения процессора p_i и расположения l , чтобы сохранить значение v . Каждый процессор имеет отдельный буфер, и каждая запись этого буфера является парой (l, v) . Некоторые из этих буферов могут быть пустыми, если ни один из ключей не хешируется соответствующим процессором. Затем выполняется шаг коммуникации от всех процессоров к всем процессорам сети (all-to-all-personalized communication) [6]. Наконец, каждый процессор извлекает (l, v) -пары из полученных буферов и сохраняет v и индекс l в соответствующих хеш-таблицах. Этот процесс можно использовать при поиске значений с учетом их соответствующих ключей. Каждый процессор хеширует свои ключи k , чтобы заполнить буфер всех процессоров p_i с индексами l . Процессоры-получатели ищут значения v в индексах l , заносят их в буфер и на шаге коммуникации от всех процессоров всем процессорам сети возвращаются значения к процессорам, которые требуют их.

Алгоритмы DP-rec и DP-att [7] используют парадигмы, основанные на записи (record-based) и на атрибуте (attribute-based) параллелизма данных соответственно. DP-rec распределяет набор данных N среди P процессоров так, чтобы каждый процессор был ответствен за равное количество атрибутов. DP-att распределяет атрибуты среди P процессоров так, чтобы каждый процессор был ответствен за N записей. Каждый процессор обрабатывает k/P атрибутов. В обеих схемах процессоры взаимодействуют друг с другом в целях расширения узла дерева. Локальные вычисления выполняются параллельно, а затем обмениваются информацией для получения лучшей глобальной точки разделения. DP-rec страдает от высоких накладных расходов на коммуникации, увеличивающихся с ростом глубины дерева, но хорошо

работает с большими объемами данных. Он эффективен, когда набор данных характеризуется большим размером обучающей выборки и небольшим количеством классов и атрибутов. DP-att имеет преимущества с точки зрения хорошей балансировки нагрузки.

Алгоритм PDT (Parallel Decision Tree) [8], использующий параллелизм данных и распределенную память, разделяет обучающие записи горизонтально на блоки равного размера среди всех процессоров. Он следует парадигме «главный-подчиненный» (*master-slave*), где главный (*master*) строит дерево и находит лучшую точку разделения. Подчиненный (*slave*) отвечает за отправление статистики частот класса к главному. Для категориальных атрибутов каждый процессор собирает локальные частоты класса и отправляет их к главному. Для числовых атрибутов каждый процессор сортирует локальные значения, находит частоты класса для точек разделения и обменивается ими со всеми другими подчиненными. Каждый подчиненный может вычислить лучшую локальную точку разделения, которая отправляется к главному, а тот затем выбирает лучшую глобальную точку разделения.

Алгоритм MWK (The Moving-Window-K Algorithm) [9] (и его предшественники BASIC и FWK), реализованный с разделяемой памятью и основанный на SPRINT, использует подход «разделяемое дерево – разделяемая база данных». MWK использует динамический параллелизм данных, основанный на атрибуте. Несколько процессоров взаимодействуют для создания разделяемого дерева решения в ширину. Используя динамическую схему планирования, каждый процессор получает атрибут для любого узла дерева на текущем уровне и оценивает точки разделения перед обработкой другого атрибута. Процессор, который оценивает последний атрибут узла дерева, также вычисляет лучшую точку разделения текущего узла. Аналогично, списки атрибутов разделены среди дочерних элементов используя параллелизм атрибутов.

SUBTREE [9] использует динамический параллелизм задач (который существует в различных поддеревьях), объединенный с параллелизмом данных в системах с разделяемой памятью. Первоначально все процессоры принадлежат одной группе и применяют параллелизм данных к корню. Как только образуются новые дочерние узлы, процессоры разбиваются на группы так, чтобы группа дочерних узлов могла быть обработана параллельно группой процессоров. Если узлы дерева, связанные с группой процессоров, становятся несмешанными (*pure*) (т. е. содержат примеры из одного класса), то эти процессоры присоединяются к некоторым другим активным группам.

Таким образом, алгоритмы SLIQ/D, SLIQ/R, SPRINT, ScalParC, DP-rec и PDT используют параллелизм данных с горизонтальным распределением, а DP-att использует вертикальное распределение в системах с распределенной памятью. Алгоритмы MWK и SUBTREE используют динамический параллелизм задач, объединенный с параллелизмом данных в системах с разделяемой памятью.

Рассмотренные алгоритмы предназначены для единого хранилища, так как все алгоритмы требуют распределения данных в начале работы. Почти все алгоритмы используют список атрибутов и распределяют их горизонтально. Невозможно распределять эти списки вертикально. Как известно, чем больше параллельные процессоры будут считать и реже общаться, тем эффективнее будет протекать весь вычислительный процесс. Необходимость взаимодействия между процессорами во всех алгоритмах снижает их производительность. Кроме того, когда дочерние элементы обрабатываются параллельно, их конст-

рукция требует совместного использования части данных их родительского узла и, следовательно, необходимо динамическое перемещение данных между процессорами. Все алгоритмы, кроме MWK и SUBTREE, распределяют данные статически, что приведет к неэффективной балансировке нагрузки, так как форма дерева решений крайне нерегулярна и объем обработки, требуемой на каждом узле дерева, может существенно различаться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чубукова И. А. Data Mining. 2-е изд., испр. М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010.
2. Анализ данных и процессов / А. А. Барсегян, М. С. Куприянов, И. И. Холод и др. 3-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2009.
3. Mehta M., Agrawal R., Rissanen J. SLIQ: A fast scalable classifier for data mining // Proc. of the Fifth Intl conf. on Extending Database Technology (EDBT), Avignon, France, 1996.
4. Shafer J., Agrawal R., Mehta M. SPRINT: A scalable parallel classifier for data mining // 22nd VLDB conf., 1996.
5. Joshi M., Karypis G., Kumar V. ScalParC: A New Scalable and Efficient Parallel Classification Algorithm for Mining Large Datasets // Intl. Parallel Processing Symposium, 1998.
6. Introduction to Parallel Computing: Algorithm Design and Analysis / V. Kumar, A. Grama, A. Gupta, G. Karypis. Benjamin-Cummings/Addison Wesley, Redwood City, CA, 1994.
7. Large scale data mining: Challenges and responses / J. Chattratichat, J. Darlington, M. Ghanem et al. // 3rd Intl. conf. on Knowledge Discovery and Data Mining, 1997.
8. Kufirin R. Decision trees on parallel processors. // Parallel Processing for Artificial Intelligence 3, Elsevier-Science. 1997.
9. Zaki M. J., Ho C. T., Agrawal R. Parallel classification for data mining on shared memory multiprocessors // 15th IEEE Intl. conf. on Data Engineering, 1999.

Z. A. Karshiyev

PARALLEL ALGORITHMS SURVEY OF DECISION TREE CONSTRUCTION

This paper presents a review of the literature on parallel formulations of building decision trees from large training sets. Most approaches exploit data parallelism by distributing the work of evaluating splitting points at each node of the tree and building the tree in a breadth-first, synchronous manner. Some other approaches exploit task parallelism by assigning a processor or a group of processors the task of building a specific subtree of the global decision tree.

Data mining, parallel algorithms, classification, decision trees

УДК: 20.53.19, 28.23.13

И. И. Холод

АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ДАННЫХ

Описываются основные направления исследований в области интеллектуального анализа распределенных данных и задачи, требующие решения по каждому направлению. В соответствии с описанными задачами предложена архитектура среды разработки и отладки алгоритмов интеллектуального анализа распределенных данных.

Интеллектуальный анализ, параллельные алгоритмы

Методы интеллектуального анализа данных (data mining в зарубежной литературе) получают все большее распространение в аналитических системах. Они позволяют извлекать скрытые знания (закономерности) из ранее накопленной информации. Учитывая, что информационные системы во всех областях деятельности человека используются уже несколько

десятилетий, объем накопленной за это время информации исчисляется десятками и сотнями терабайт. При этом информация хранится в разных форматах и на разных носителях. При всей сложности работы с такими разнородными источниками информации анализ именно такого объема информации хранит в себе наибольший потенциал для выявления новых знаний.

Развитие алгоритмов интеллектуального анализа данных в основном направлено на создание новых алгоритмов, позволяющих строить модели знаний. Богатое разнообразие алгоритмов объясняется привлечением опыта из смежных областей науки: статистики, нейронных сетей, нечеткой логики, генетических алгоритмов и др. Кроме того, в новых алгоритмах пытаются решить существующие проблемы, связанные с качеством данных: наличием пропущенных данных, шумов, разнотипностью данных и др. Подавляющее большинство существующих алгоритмов интеллектуального анализа предназначены для анализа информации из одного локального источника. Эксперименты, иллюстрирующие работу таких алгоритмов и подтверждающие достижение поставленных целей, проводятся на сравнительно небольших объемах данных. В связи с этим актуальна проблема анализа возможностей и поиска путей адаптации существующих алгоритмов для их применения к анализу данных в распределенной гетерогенной среде.

Целью такого исследования является разработка методов (методологии, технологии) проектирования и анализа алгоритмов интеллектуального анализа распределенных данных.

Для достижения данной цели исследования должны проводиться по следующим направлениям:

- 1) создание шаблонов проектирования алгоритмов интеллектуального анализа данных для их выполнения в распределенной гетерогенной среде;
- 2) создание методов априорных оценок и моделирования работы алгоритмов интеллектуального анализа данных в распределенной гетерогенной среде;
- 3) разработка подходов трансформации различных форматов исходных данных к виду, пригодному для анализа.

В рамках первого направления в итоге должна быть создана библиотека алгоритмов интеллектуального анализа распределенных данных. Для этого должны решаться следующие задачи:

- анализ стандартов data mining;
- анализ существующих библиотек алгоритмов интеллектуального анализа;
- анализ алгоритмов интеллектуального анализа данных;
- анализ подходов параллельного выполнения алгоритмов;
- разработка структуры библиотеки;
- разработка и реализация библиотеки алгоритмов.

Анализ стандартов data mining (CWM, JDM API, PMML), описывающих структуры алгоритмов интеллектуального анализа данных и получаемых с их помощью результатов, должен проводиться с целью определения общих подходов в работе алгоритмов и блоков в их структуре. Должны быть определены крупные блоки на уровне этапности выполнения алгоритмов. При этом необходимо учитывать возможную вложенность алгоритмов, т. е. возможность использования алгоритмом, решающим целевую задачу, других алгоритмов, решающих промежуточные задачи.

Анализ структур библиотек алгоритмов интеллектуального анализа данных (Xelopes, Weka, R) необходим для определения поддерживаемых ими стандартов (и их элементов), определения лучших структурных элементов и реализуемых алгоритмов. При анализе необходимо будет обратить внимание на простоту использования существующих алгоритмов и простоту добавления в нее новых алгоритмов. Также необходимо определить возможность параллельного выполнения алгоритмов.

Анализ алгоритмов интеллектуального анализа данных для различных задач и их реализации в существующих библиотеках (таких, как Xelopes и Weka) проводится с целью их иерархической классификации по структуре. Каждый уровень такой иерархии должен отличаться от предыдущего большей детализацией структуры. Алгоритмы, находящиеся на одном уровне, и относящиеся к разным классам, должны отличаться друг от друга составом блоков в своей структуре. Таким образом, алгоритмы, относящиеся к одному конечному классу иерархии, должны содержать одинаковые блоки и иметь идентичную структуру.

Анализ подходов параллельного выполнения алгоритмов должен осуществляться с целью выбора средств реализации параллельных алгоритмов, а также подходов к решению основных задач, возникающих в распределенных системах: идентификации потоков, взаимодействия, синхронизации и т. п.

В результате разработки структуры библиотеки должны быть созданы пакеты и иерархия базовых классов для реализации алгоритмов интеллектуального анализа и их выполнения. Структура должна удовлетворять следующим требованиям:

- базироваться на стандартах data mining: CWM, JDM API и PMML;
- определять блочную структуру алгоритмов, при которой можно создавать новые алгоритмы комбинируя существующие блоки и заменяя блоки в существующих алгоритмах на новые;
- позволять параллельное выполнение блоков алгоритмов;
- оценивать отдельные блоки алгоритма и весь алгоритм в целом на основе блочных оценок.

Разработка и реализация библиотеки алгоритмов интеллектуального анализа должна быть выполнена на основании результатов решения описанных выше задач и удовлетворять следующим требованиям:

- соответствовать основным стандартам data mining;
- позволять выполнять имеющиеся в ней алгоритмы в распределенной гетерогенной среде;
- использовать имеющиеся блоки алгоритмов для построения новых алгоритмов;
- применять имеющиеся алгоритмы к разным источникам и форматам данных;
- позволять расширять состав алгоритмов.

В рамках второго направления должны быть разработаны методы априорной оценки эффективности работы алгоритмов. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- анализ существующих методов оценки алгоритмов;
- анализ существующих методов моделирования выполнения алгоритмов;
- анализ основных способов формального описания работы алгоритмов;
- реализация методов оценки применительно к библиотеке алгоритмов интеллектуального анализа данных.

Анализ существующих методов оценки алгоритмов, в том числе и параллельных, должен проводиться с целью выбора (или создания нового на основе существующих) наиболее эффективного метода априорной оценки распределенного выполнения алгоритмов анализа данных. Данный метод оценки может допускать выполнение отдельных блоков алгоритма и экспериментальное измерение параметров их работы. Оценка должна проводиться по следующим параметрам:

- увеличение времени работы алгоритма с ростом количества анализируемых данных;
- эффективность и ускорение работы алгоритма при параллельном его выполнении в заданной конфигурации.

Анализ методов моделирования выполнения параллельных алгоритмов необходим для выбора и/или создания нового эффективного метода моделирования работы алгоритма анализа данных в распределенной среде. Данный метод оценки может допускать выполнение отдельных блоков алгоритма и экспериментальное измерение параметров их работы. Моделирование должно выявлять следующие проблемы параллельного выполнения алгоритмов:

- взаимоблокировки (дедлоки) параллельных процессов;
- возникновение тупиков в работе алгоритма;
- образование «гонок» за общие ресурсы;
- несбалансированность распределения блоков алгоритмов по процессорам и др.

Анализ основных способов формального описания работы алгоритмов (блок-схемы, UML-диаграммы, сети Петри) необходим, чтобы определить наиболее подходящие способы описания алгоритмов анализа для работы в распределенной среде или создать новый. При этом предложенный способ описания должен позволять:

- наглядно представить алгоритм и его параллельное выполнение;
- описывать работу с источниками данных;
- описывать формирование моделей выявляемых знаний;
- описывать распределение блоков алгоритма по разным процессам (процессорам);
- выполнить с его помощью оценки алгоритма предложенным ранее способом;
- смоделировать с его помощью работу алгоритма предложенным ранее способом;
- связать элементы описания с реальными блоками программного кода, реализующего данный алгоритм (выполнить прямую или обратную генерацию кода по описанию).

Предложенные способы описания алгоритмов, методы оценки и моделирования должны быть реализованы в виде программных модулей, позволяющих выполнять автоматическую оценку и моделирование работы алгоритма по заданному описанию. При этом данный модуль должен быть интегрирован с библиотекой алгоритмов и использовать реализованные в ней блоки алгоритмов для эксперимента.

В третьем направлении необходимо реализовать методы трансформации различных форматов информации к единому виду, доступному для применения к ним алгоритмов интеллектуального анализа. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- анализ стандартов и методологий преобразования и очистки данных;
- анализ существующих инструментов преобразования данных;
- анализ существующих форматов и источников данных, подвергаемых интеллектуальному анализу;

- определение единого формата данных для работы с алгоритмами интеллектуального анализа;
- разработка методологии преобразования форматов к единому;
- реализация методов трансформации и очистки данных из различных форматов к единому.

Анализ существующих методологий (ETL) должен выполняться с целью определения:

- выполняемых при преобразованиях этапов;
- решаемых на каждом этапе задач;
- применяемых для решения каждой задачи методов.

Анализ существующих инструментов преобразования данных (Pentaho Kettle, Talend Open Studio и др.) необходим для выбора инструмента(ов), интегрируемого с библиотекой алгоритмов интеллектуального анализа данных. Такой инструмент(ы) должен позволять:

- работать с разными источниками данных и расширять их перечень;
- выполнять все стандартные этапы преобразования и комбинировать их;
- расширять методы, используемые на разных этапах преобразования;
- преобразовывать данные к единому формату, пригодному для выполнения интеллектуального анализа (например, прямоугольная таблица).

Анализ различных видов форматов представления данных, к которым применяются алгоритмы интеллектуального анализа, должен проводиться с целью разработки подходов их трансформации к единому формату. Для каждого исходного формата данных должны быть определены задачи анализа, в которых они могут участвовать.

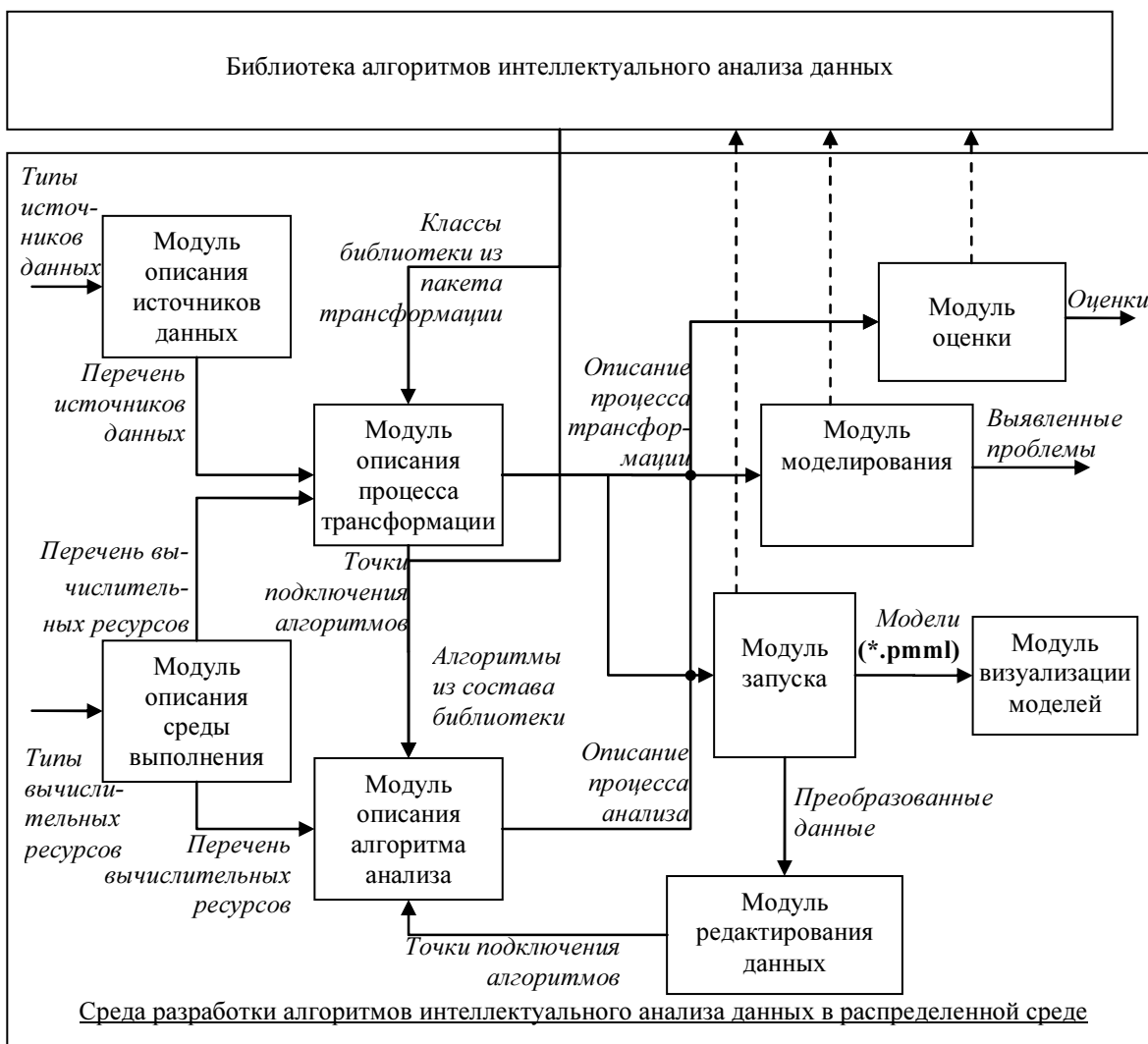
Анализ алгоритмов интеллектуального анализа и стандартов data mining (CWM, JDMAPI, PMML в части исходных данных) должен выполняться с целью определения единого формата, к которому могут быть применены такие алгоритмы. Данный формат должен соответствовать стандартам PMML и CWM в части исходных данных. Впоследствии он должен быть реализован в библиотеке алгоритмов. С ним должны работать все алгоритмы, входящие в библиотеку.

Разработка методологии преобразования различных форматов исходных данных к единому формату, используемому алгоритмами интеллектуального анализа, должна быть поддержана архитектурой преобразователя. Архитектура должна удовлетворять следующим требованиям:

- позволять выполнять все стандартные этапы преобразований;
- расширять методы, используемые на этих этапах;
- расширять исходные форматы данных;
- интегрироваться с существующими инструментами преобразований.

Разработанная методология (архитектура) должна быть реализована в виде отдельного пакета трансформации библиотеки алгоритмов.

Все направления тесно связаны между собой, и конечные результаты, достигнутые по ним, в итоге должны привести к созданию среды для разработки и отладки алгоритмов интеллектуального анализа данных в распределенной гетерогенной среде. Модули такой среды и взаимодействие между ними представлены на рисунке.



- Передача данных
- - - - -> Запуск классов библиотеки

Модуль описания среды выполнения должен позволять описывать вычислительную среду (компьютеры), в которой будут выполняться блоки алгоритма и трансформации. Описание должно происходить путем создания перечня вычислительных ресурсов – элементов среды. Для каждого элемента среды должны указываться его тип (процессор, компьютер или др.), в зависимости от типа – его характеристики.

Входными данными для модуля будут: типы вычислительных ресурсов, доступные в среде разработки, и информация о каждом элементе среды, вводимая пользователями.

Результатом работы модуля будет перечень вычислительных ресурсов.

Модуль описания источников данных должен позволять описывать источник(и) данных. Описание должно выполняться добавлением в перечень нового источника определенного типа. Для каждого источника должны определяться настройки доступа, причем для каждого типа источника они будут свои.

Входными данными модуля будут: типы источников данных, доступные в среде разработки, и характеристики источников, вводимые пользователями.

Результатом работы модуля будет перечень источников данных.

Модуль описания процесса трансформации должен позволять описывать процесс построения модели, включая этапы трансформации данных из разных источников с указанием распределения по имеющимся вычислительным ресурсам. Цепочки трансформации должны определяться для каждого из источников. В начале цепочки должен указываться источник из перечня, в конце – единый формат. При этом цепочки могут как объединяться в единую последовательность, так и оставаться параллельными. Каждый блок цепочки однозначно сопоставляется классу библиотеки из пакета трансформации.

Входными данными модуля будут:

- перечень источников;
- перечень вычислительных ресурсов;
- классы библиотеки из пакета трансформации.

Выходными данными модуля будут:

- описание процесса трансформации от разных источников с распределением по вычислительным узлам (с возможностью сохранения в файле и графическим отображением);
- перечень точек подключения алгоритмов анализа (концы цепочек трансформации).

Модуль редактирования данных должен позволять редактировать данные, получаемые в конце цепочек трансформации. Редактирование может заключаться в непосредственном изменении данных, полученных после трансформации, с последующим сохранением (в виде файла). При этом сохраненный файл становится точкой подключения алгоритма наряду с окончанием цепочки трансформации.

Входными данными модуля будут преобразованные данные и перечень точек подключения алгоритмов анализа (концы цепочек трансформации).

Результатом работы модуля будут отредактированные данные, сохраняемые в файле, как новые точки подключения алгоритмов анализа.

Модуль описания алгоритма анализа должен позволять для каждой точки подключения алгоритма указать применяемые алгоритмы из состава библиотеки. При этом модуль должен позволять описать распределение блоков алгоритма по доступным вычислительным ресурсам (для этого при добавлении алгоритма алгоритм декомпозируется на блоки, из которых он конструируется). На выходе алгоритма должна быть определена модель, получаемая после выполнения алгоритма (модель должна определяться выбранным алгоритмом или наоборот, алгоритм определяется выбранной моделью).

Входными данными модуля будут:

- перечень вычислительных ресурсов;
- алгоритмы из состава библиотек;
- точки подключения алгоритмов (окончания цепочек трансформации; сохраненные после редактирования данные).

Результатом работы модуля будет описание процесса анализа (построения модели) от разных точек подключения с распределением по вычислительным узлам. Данное описание должно сохраняться в файле и графически отображаться пользователю.

Модуль оценки должен оценивать временные параметры выполнения трансформации и алгоритма в зависимости от объема данных, а также эффективность параллельного выполнения при заданном распределении блоков по вычислительным ресурсам. Входными данными модуля будут описание процесса трансформации и описание процесса анализа.

Результатом работы модуля будут вычисленные характеристики для каждого блока и интегральные оценки.

Модуль моделирования должен моделировать трансформацию и работу алгоритма для выявления возможных проблем при параллельном выполнении. Входными данными модуля будут описание процесса трансформации и описание процесса анализа.

Результатом работы модуля будут выявленные проблемы и предлагаемые решения.

Модуль запуска должен выполнять описанные процессы трансформации и анализа по заданным описаниям, распределив предварительно отдельные блоки по заданным вычислительным ресурсам. Входными данными модуля будут:

- описание процесса трансформации;
- описание процесса анализа.

Выходными данными модуля будут преобразованные данные, сохраненные в файле, и построенные модели в формате pmml.

Модуль визуализации моделей должен отображать определенным способом ранее построенную и сохраненную в формате pmml модель.

Входными данными модуля будут модели в формате pmml. Выходными данными будут визуализированные модели.

Среда разработки алгоритмов интеллектуального анализа, обладающая описанным функционалом, позволит значительно упростить и снизить стоимость адаптации существующих алгоритмов анализа и разработки новых для работы в распределенной гетерогенной среде.

I. I. Kholod

ARCHITECTURE OF DEVELOPMENT TOOL DISTRIBUTED DATA MINING ALGORITHMS

The article describes the main areas of research in the field of mining of distributed data and problems to be solved in each direction. In accordance with the objectives outlined proposed architecture development environment and debug algorithms for mining distributed data.

Mining, parallel algorithms

УДК 681.32

В. А. Кирьянчиков, А. С. Романов

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ МОДУЛЬНЫХ ТЕСТОВ ПО ДИАГРАММАМ СОСТОЯНИЙ

Рассматривается методика автоматизированной генерации модульных тестов на основе диаграмм состояний, приводится пример диаграммы состояний с различными видами переходов и соответствующие им наборы описаний тестов, предлагается алгоритм и процесс генерации модульных тестов по наборам их описаний, отмечается эффективность предлагаемой методики генерации тестов при разработке реальных программных продуктов.

Тестирование на основе моделей, язык UML, диаграмма состояний, язык OCL, система ПРОЛОГ

Тестирование программного обеспечения (ПО) – это процесс исследования ПО с целью обнаружения ошибок для их последующего исправления. Тестирование является существенной и неотъемлемой частью жизненного цикла ПО. Как правило, на тестирование затрачивается большое количество ресурсов. Более того, при ручном тестировании обыч-

но возникают проблемы, связанные с отсутствием возможности в заданные сроки разработать набор тестов, полностью проверяющих корректность работы программы, и эти проблемы сказываются на качестве выпускаемого продукта. В связи с этим возникает необходимость в создании качественных тестов, разработанных по методике, позволяющей автоматизировать процесс их разработки.

Тестирование на основе моделей – это методология тестирования ПО, в соответствии с которой варианты тестирования получаются из модели, описывающей существенные для разработчика аспекты функционирования системы. В данной статье предлагается методика составления тестов по модели, представляющей поведенческие аспекты системы, так как именно такие модели дают наиболее полную спецификацию того, как должна реагировать система на управляющие воздействия. В качестве языка описания моделей был выбран унифицированный язык моделирования UML, который в последние годы получил большую популярность среди разработчиков объектно-ориентированных программ и принят в качестве международного стандарта. Язык UML является графическим языком моделирования, в котором модели представляются как набор диаграмм и могут быть описаны в формате XML по стандартной схеме, задаваемой языком. Всего в UML используются 16 видов диаграмм, которые можно разделить на 3 группы: структурные диаграммы, диаграммы поведения и диаграммы взаимодействия [1]. В данной статье рассматривается методика составления модульных тестов на основе диаграммы состояний, моделирующей поведение одного экземпляра некоторого класса.

Такая диаграмма состояний (ДС) предназначена для описания всех возможных состояний экземпляра определенного класса и возможных последовательностей его переходов из одного состояния в другое. Она моделирует реакцию объекта на внешние воздействия, такие, как вызов метода этого объекта либо получение объектом некоторого сигнала. Диаграмма состояний состоит из состояний, переходов, событий и действий и представляет собой автомат, на котором показан поток управления от одного состояния к другому. Состояния изображаются прямоугольниками со скругленными углами, а переходы – помеченными стрелками. Каждый переход нагружен тройкой элементов:

$$\text{event} [\text{guard condition}] / \text{action},$$

где event – событие, вызывающее переход из одного состояния в другое; guard condition – защитное условие – логическое выражение, при истинности которого переход может быть осуществлен; action – действие, выполняемое при переходе. Кроме простых состояний на диаграмме состояний могут присутствовать составные состояния. Составное состояние (composite state) – это сложное состояние, состоящее из других вложенных в него состояний. Пример диаграммы состояний с простыми и составными состояниями показан на рис. 1. Данная диаграмма моделирует поведение объекта класса *стек*. Стек может находиться в одном из трех состояний: пустой, неполный и полный. Состояния «Неполный» и «Полный» входят в составное состояние «Непустой». Это означает, что если объект находится в состоянии «Неполный» или «Полный», то он также находится в состоянии «Непустой». Стрелки между состояниями обозначают направление перехода, который происходит по наступлению события при условии выполнения защитного условия. Переход «Непустой → Пустой» означает, что в каком бы из состояний, входящих в состав состояния «Непустой», ни находился объект, он

перейдет в состояние «Пустой» при наступлении события pop и выполнении условия $top = 1$. Составные состояния используются для объединения состояний в логические группы и позволяют сократить количество стрелок на диаграммах.

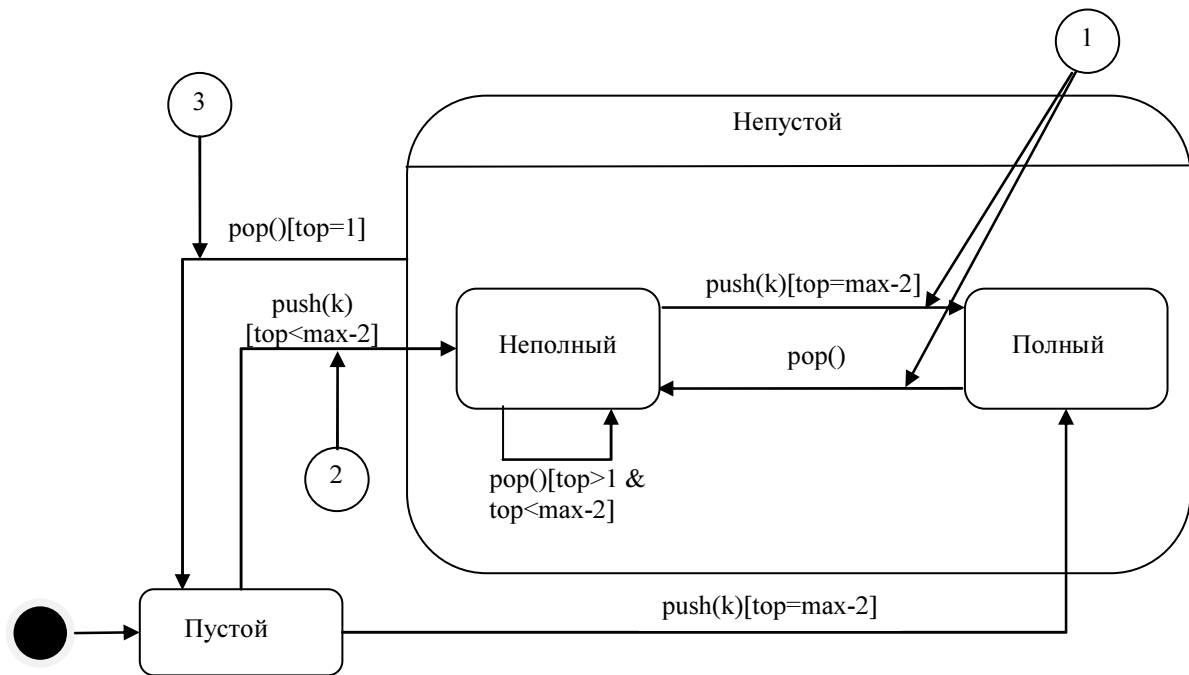


Рис. 1

Алгоритм составления тестов по ДС состоит из следующих шагов:

- 1) организовать последовательный выбор всех переходов, присутствующих на ДС;
- 2) определить набор тестов, необходимых для проверки выбранного перехода;
- 3) создать описание каждого теста из сформированного набора;
- 4) для каждого описания теста сгенерировать код теста на языке реализации;
- 5) если не все переходы рассмотрены, перейти к анализу следующего перехода, иначе завершить формирование тестов.

Каждое описание теста в наборе тестов некоторого перехода состоит из следующих частей:

- начального состояния, в котором должен находиться объект (StartState);
- условия, которое должно быть выполнено (Condition);
- описания сигнатуры метода, который должен быть вызван. Сигнатура метода описана в иницилирующем событии, представленном объектом класса Operation;
- целевого состояния (EndState) – состояния, в котором должен находиться объект после вызова метода Operation при выполнении условия Condition.

Для различных видов переходов составляются различные наборы тестов, которые могут отличаться числом элементов. На диаграмме состояния (рис. 1) присутствуют переходы одного из трех видов:

1. Переход между двумя простыми состояниями. Переходы этого вида на рис. 1 обозначены цифрой «1». Переход, источником которого является простое состояние, однозначно определяет состояние объекта, в котором он может находиться. Поэтому для проверки корректности срабатывания перехода необходимо составить 2 теста. Первый тест проверя-

ет, что объект перейдет в целевое состояние перехода, если в момент возникновения иницирующего события защитное условие перехода выполнено. Второй тест проверяет, что объект не изменит своего состояния, если защитное условие перехода не выполнено.

2. Переход между простым и составным состояниями. Переход этого вида на рис. 1 обозначен цифрой «2». При срабатывании этого перехода управление передается в начальное состояние целевого составного состояния, а из него – в некоторое состояние В. Состояние В может быть простым, составным или конечным. Если состояние В является составным, то необходимо составить конечную последовательность переходов $initB \rightarrow Composite1 \rightarrow initComposite1 \rightarrow \dots \rightarrow endState$, где $endState$ – простое либо конечное состояние. В данном случае надо создать столько тестов, сколько переходов имеется в составленной цепочке, и еще один. Последний тест проверяет, что при выполнении защитного условия каждого перехода из последовательности объект перейдет в состояние $endState$. Остальные тесты предназначены для проверки того, что если защитное условие какого-либо перехода не выполнено, то объект будет находиться в исходном простом состоянии.

3. Переход, исходящий из составного состояния. Переход этого вида на рис. 1 обозначен цифрой «3». При срабатывании такого перехода объект может оказаться в исходном составном состоянии (Source) и в одном из простых состояний (Child), напрямую или косвенно вложенных в Source. Количество всех вложенных простых состояний обозначим $childCount$. При срабатывании рассматриваемого перехода объект переходит в целевое состояние, которое может быть как простым, так и составным. В обоих случаях составляется последовательность переходов $Child \rightarrow \dots \rightarrow endState$, где $endState$ – простое состояние. Количество переходов в составленной последовательности обозначим $chainLength$. Количество тестов, которые нужно составить для проверки перехода рассматриваемого вида, определяется произведением $childCount * chainLength$. Каждый из тестов проверяет, что при возникновении иницирующего события объект перейдет из состояния Child в состояние $endState$, если выполняются защитные условия всех переходов в последовательности, или останется в исходном состоянии Child, если не будет выполнено защитное условие хотя бы одного из переходов последовательности.

На основе описания каждого теста генерируется код теста, который состоит из следующих частей:

- 1) инициализация атрибутов объекта и параметров метода Operation такими значениями, чтобы выполнялось условие Condition;
- 2) инициализация остальных атрибутов объекта такими значениями, чтобы объект находился в состоянии StartState;
- 3) вызов метода Operation;
- 4) проверка того, что объект перешел в состояние EndState.

Инициализацию переменных, входящих в состав булевского выражения, описывающего некоторое условие Condition, можно выполнить, если подобрать их значения, обеспечивающие истинность данного выражения. Для автоматизации определения этих значений переменных следует представить булевские выражения на некотором формальном языке, чтобы выполнять разбор выражений с помощью традиционных методов разбора языковых конструкций и трансляции. Описание этих методов можно найти в [2], [3]. Од-

ним из формальных языков, входящих в стандарт UML и применяемых для описания выражений, которые задают ограничения, накладываемые на элементы моделей, представленных на языке UML, является язык OCL (Object Constraint Language). Ключевыми возможностями языка OCL для генерации модульных тестов по диаграммам состояний являются удобство описания защитных условий и удобство определения ограничений, накладываемых на атрибуты объекта, находящегося в некотором состоянии.

Для определения области значений переменных, при которых защитное условие принимает значение «истина», удобно использовать систему логических выводов ПРОЛОГ. Это объясняется подобием языков OCL и ПРОЛОГ и наличием в системе ПРОЛОГ возможностей определения входных предпосылок, приводящих к истинности результата логического вывода. При таком подходе OCL-выражение сначала преобразуется в запрос к системе ПРОЛОГ, а в результате обработки этого запроса система ПРОЛОГ выдает описание области значений переменных, при которых выполняется защитное условие. На основе этого описания генерируется код на объектно-ориентированном языке (ООЯ), например на языке Java, инициализирующий переменные соответствующими значениями.

Поскольку генерируемые тесты должны проверять работу объектно-ориентированной программы, то их целесообразно представлять тоже на ООЯ. Поэтому авторами был разработан транслятор из выражений на языке OCL в код на языке Java. Данный транслятор преобразует OCL-выражения в запросы к системе ПРОЛОГ и на основании ответов от системы ПРОЛОГ генерирует код на языке Java, инициализирующий переменные значениями, обеспечивающими истинность OCL-выражений.

Архитектура транслятора выбиралась таким образом, чтобы его можно было использовать для генерации кода тестов на другом языке реализации, например C++, C#, ObjectPascal. Эта возможность достигается за счет того, что в ходе разбора OCL-выражений генерируется не сам код теста, а последовательность имен функций и их параметров, которые должны быть вызваны для генерации кода теста. Заменой модуля, реализующего данные функции, осуществляется переход к другому языку реализации тестов.

Проверка того, что объект находится в некотором состоянии, необходимая, например, для того, чтобы проверить переход объекта в состояние EndState, может выполняться с помощью программных средств, разработанных в рамках проекта MDD (Model-Driven Development). Эти программные средства являются компонентами среды разработки Eclipse.

Полная схема генерации кода unit-тестов по диаграммам состояния приведена на рис. 2.

Для применения описанной методики создания тестов в реальных проектах, связанных с разработкой программных средств (ПС) на языке Java, описанный ранее инструмент автоматизированной генерации модульных тестов был выполнен в виде набора плагинов, которые были включены в среду разработки Eclipse посредством механизма точек расширения [4]. Внедрение в среду разработки Eclipse позволяет автоматически создавать модульные тесты на основе диаграмм состояний в пределах одной среды разработки. Выбор среды Eclipse также обусловлен тем, что для генерации кода классов были использованы средства генерации, разработанные и поддерживаемые в рамках проекта EMF (Eclipse Modeling Framework).

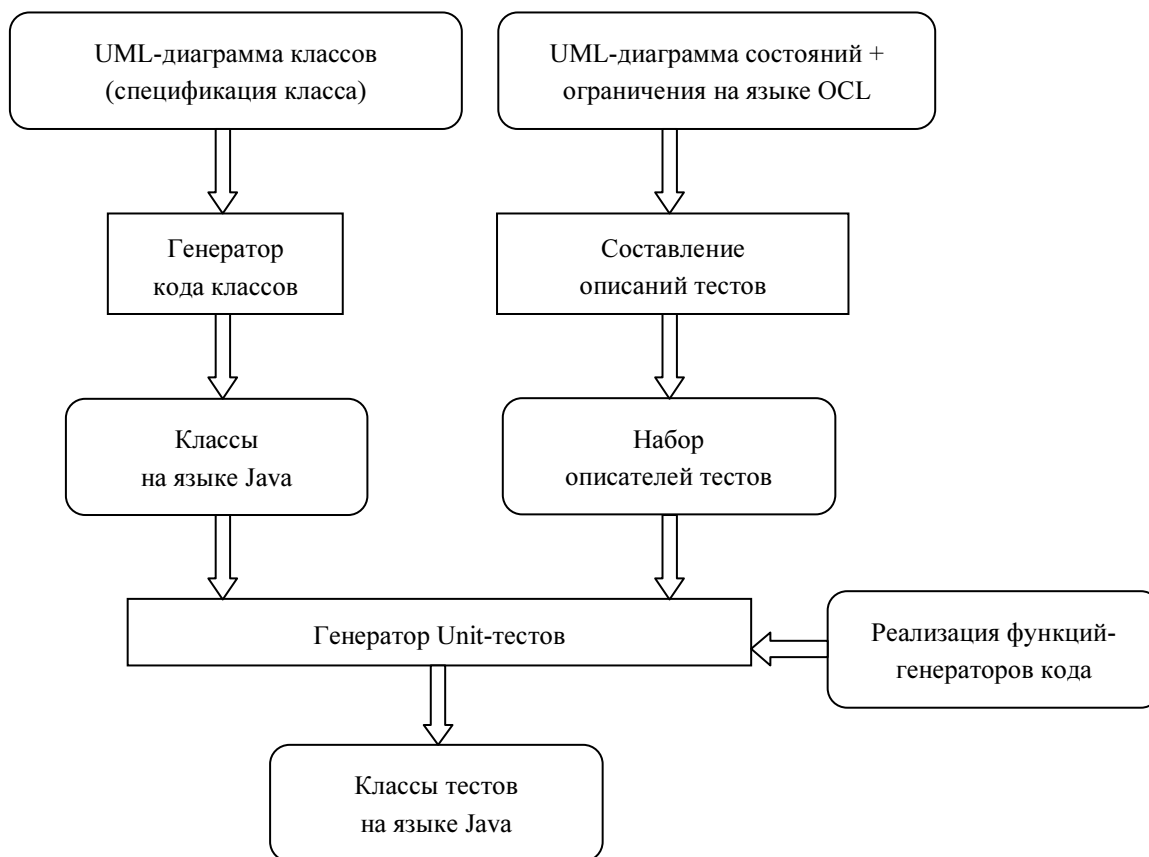


Рис. 2

Программное средство, реализующее описанную методику, нашло применение в процессе разработки ПС «Редактор Мнемосхем» [5] для тестирования компонентов программы, характеризующихся сложным поведением. Это позволило более, чем в 2 раза сократить время тестирования «Редактора Мнемосхем» при обеспечении высокого качества разрабатываемого продукта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буч Г., Рамбо Д., Джекобсон А. Язык UML. Руководство пользователя. СПб.: ДМК-Пресс, 2004.
2. Ахо А, Сети Р., Ульман Д. Компиляторы. Принципы, технологии, инструменты. М.: Вильямс, 2003.
3. Опалева Э. А., Самойленко В. П. Языки программирования и методы трансляции. СПб.: БХВ, 2005.
4. Гамма Э., Бек К. Расширения ECLIPSE: принципы, шаблоны и подключаемые модули. М.: Кудиц-образ, 2005.
5. Маевский С. В., Романов А. С. Разработка средств построения и использования иерархических мнемосхем для визуализации алгоритмов анализа характеристик динамических объектов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Вып. 10. 2010. С. 51–55.

V. A. Kirianchikov, A. S. Romanov

THE AUTOMATED UNIT TEST GENERATION BASED ON THE STATECHART DIAGRAM

The article describes methods of the automated unit test generation based on UML statechart diagrams. Different versions of state diagrams are considered and appropriate sets of test descriptions are given. In conclusion the scheme of the unit test generation process using above-mentioned test description is suggested.

Model-Based Testing, UML, Statechart diagram, OCL, Prolog

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ЛИНИЙ ЗАДЕРЖКИ В ТОПОЛОГИИ ПЕЧАТНОГО МОНТАЖА

Предложен подход к решению проблемы согласования задержек в линиях передачи сигналов на печатных платах в системе гибкой топологической трассировки.

Печатный монтаж, линии задержки, согласование задержек, топологическая трассировка, алгоритм автоматического формирования

При проектировании высокоскоростной цифровой электроники приходится решать проблему синхронизации тактируемых сигналов в точках приема. Чтобы получить приемлемую расфазировку, недостаточно просто протянуть ко всем точкам сети линии передачи одинаковой длины. Необходимо, чтобы все эти трассы обеспечивали одинаковые задержки сигналов. Отметим, например, что дорожки на внешних сторонах платы (или микрополосковые дорожки) по сравнению с дорожками на внутренних слоях (или полосковыми дорожками) обладают более высокой скоростью распространения сигнала. Кроме того, необходимо единообразно согласовать линии синхронизации и обеспечить одинаковые оконечные нагрузки. От того, насколько полно будут выполнены эти 3 требования, зависит точность согласования линий синхронизации.

Для удовлетворения первого требования (обеспечения одинаковых задержек) необходимо иметь средства автоматического создания проводников заданной длины и механизмы синхронизации задержек в сигналах с учетом формы проводников и особенностей среды распространения сигнала.

В современных САПР (Allegro, Expedition) увеличение длины проводников (и, соответственно, задержки) обычно осуществляется добавлением изломов с регулируемой высотой и зазором.

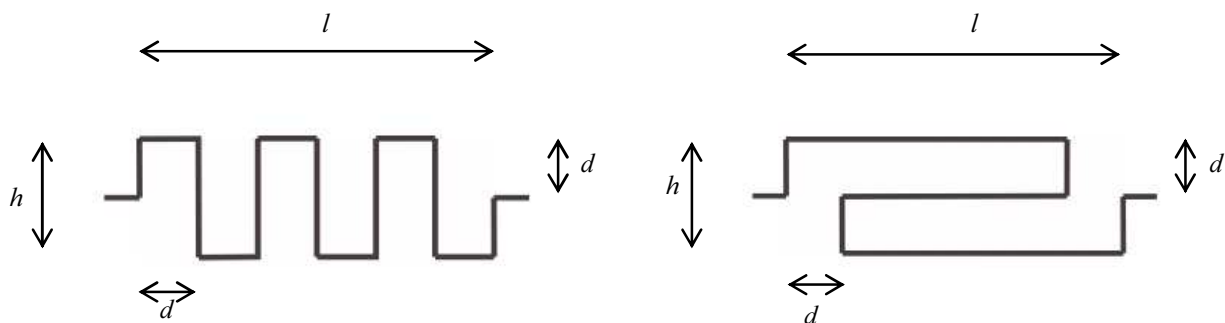


Рис. 1

Рис. 2

На рис. 1 и 2 приведены 2 варианта линий задержки, в которых используется способ увеличения длины проводников. Такие приемы применяются в системе «Allegro». При этом первый вариант (рис. 1) в терминологии фирмы «Allegro» называется accordion (аккордеон), а второй (рис. 2) – trombone (тромбон).

Уменьшая шаг d между секциями можно при тех же h и l увеличивать длину L проводника, однако уменьшение d имеет определенные пределы, связанные как с шириной проводника (w), так и с минимальным зазором, при котором не возникает проблем с целостностью сигнала. Обычно d должно быть не меньше $3w$, поэтому получить сколь угодно большую длину на относительно малой площади не удастся.

Жесткость конфигурации линии задержки и последовательный характер решения задачи синхронизации задержек при таких подходах не позволяют подстраиваться при изменении ситуации (например, автоматически изменить параметры уже сформированных линий задержки при переключке самого длинного проводника в группе более коротким путем или при вынужденном увеличении его длины).

Основными факторами, влияющими на длительность задержки в печатном проводнике, являются [1]:

- длина проводника;
- расположение проводника (микростриповая или стриповая линия);
- конфигурация проводника.

При формировании зигзагообразных линий задержки следует учитывать наличие перекрестных связей между соседними секциями. Перекрестные связи в длинных, связанных друг с другом секциях, приводят к значительным искажениям сигнала [1]. Если секции короткие, то искажения, вызванные перекрестной связью, мало влияют на форму переднего фронта и приводят лишь к уменьшению задержки. Это уменьшение можно компенсировать, добавив новые секции, но при этом увеличивается площадь, занимаемая линией задержки. Ослабить перекрестную связь и даже устранить проблему можно увеличением зазора между секциями, но при этом также возрастает площадь, занимаемая линией задержки.

Для конструктора было бы удобно, чтобы линии задержки в системе гибкой топологической трассировки сами автоматически поддерживали заданные соотношения между задержками сигналов в линиях передачи, оперативно реагируя на малейшие изменения топологического рисунка платы.

Для управления длительностью задержки сигналов в САПР ТороR введен специальный объект – змейка [2] и ограничивающая ее область – трапеция, задаваемая пользователем.

Змейка представляет собой набор последовательно идущих друг за другом прямолинейных и дугообразных участков проводников (рис. 3). Дуги могут быть аппроксимированы отрезками прямых.

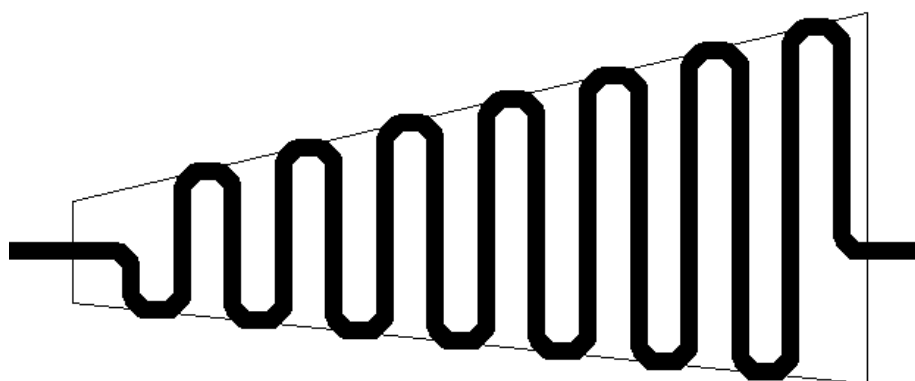


Рис. 3

Высота трапеции, длины оснований и углы наклона боковых сторон трапеции регулируются пользователем. В трапецию вписывается змейка необходимой длины (с заданным зазором между проводниками) при наличии достаточного пространства или максимально возможной длины в случае недостаточного пространства. Подробный расчет формы змейки приведен в [2].

При автоматическом формировании змеек используются прямоугольные области, расставляемые автоматически или вручную, размеры которых автоматически регулируются.

Алгоритм формирования змеек на печатной плате состоит из двух основных этапов:

1) определить множество сигналов, нуждающихся в увеличении задержки, и рассчитать необходимую добавку к текущей задержке;

2) для каждого проводника, передающего соответствующий сигнал, следует осуществить следующие операции:

- слишком короткие сегменты, образующие тупой угол (рис. 4, *а*), объединить в один сегмент, соединяющий начало первого и конец второго сегментов (рис. 4, *б*);

- слишком длинные сегменты подразбить для обеспечения большей свободы при их последующей раздвижке;

- на месте полученных сегментов, уменьшенных на некоторую величину, создать прямоугольные области (рис. 4, *в*), ширину которых рассчитать исходя из требуемой добавки задержки;

- осуществить автоматическую раздвижку для ликвидации возможных нарушений зазоров, появившихся в результате увеличения ширины сегментов;

- уменьшить ширину прямоугольных областей в «узких местах» и ликвидировать слишком узкие прямоугольные области (если их ширина меньше 1.5 ширины проводника, то их следует заменить на сегмент проводника);

- скорректировать в сторону увеличения ширину прямоугольных областей в сигналах, на которых были «подрезаны» или удалены прямоугольные области;

- разместить змейки в полученных областях (рис. 4, *г*);

- осуществить автоматическую раздвижку областей змеек.

Описанный алгоритм автоматического создания областей топологических линий задержки, расчета и коррекции их размеров с учетом выполнения конструктивно-технологических нарушений реализован в системе гибкой топологической трассировки «ТороR». При этом проектировщику предоставляются широкие возможности по оперативному формированию различных линий задержки как в ручном, так и в автоматическом режимах.

При ручном формировании трапеция (первоначально прямоугольник) создается на месте выделенного фрагмента проводника.

Для задания параметров серпантина (змейки) используется окно свойств, вкладка «задержка» (рис. 5). Проектировщик может задать величину зазора между соседними изломами (по умолчанию – две толщины проводника) и значение требуемой задержки (длины проводника). При этом в окне свойств показывается диапазон (минимальное и максимальное значения) возможной задержки (длины проводника) в заданной трапеции. Высота трапеции, длина оснований и углы наклона боковых сторон трапеции регулируются перемещением маркеров на сторонах трапеции.

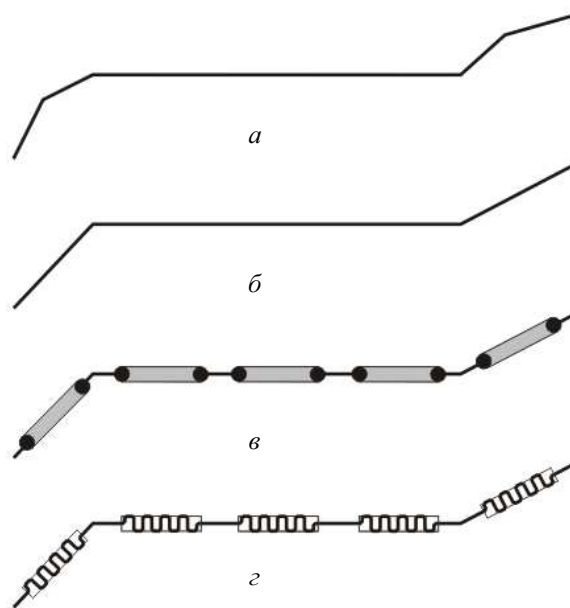


Рис. 4

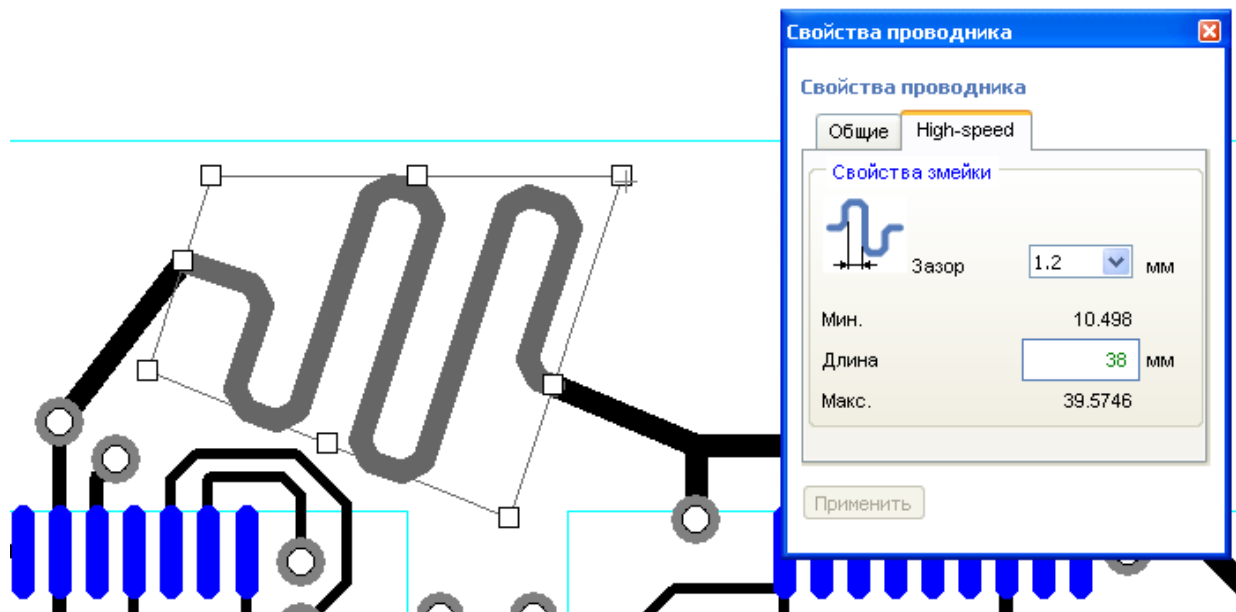


Рис. 5

Автоматическое создание змеек на всех предварительно выбранных проводниках (рис. 6), нуждающихся в выравнивании, осуществляется командой «Создать змейки».

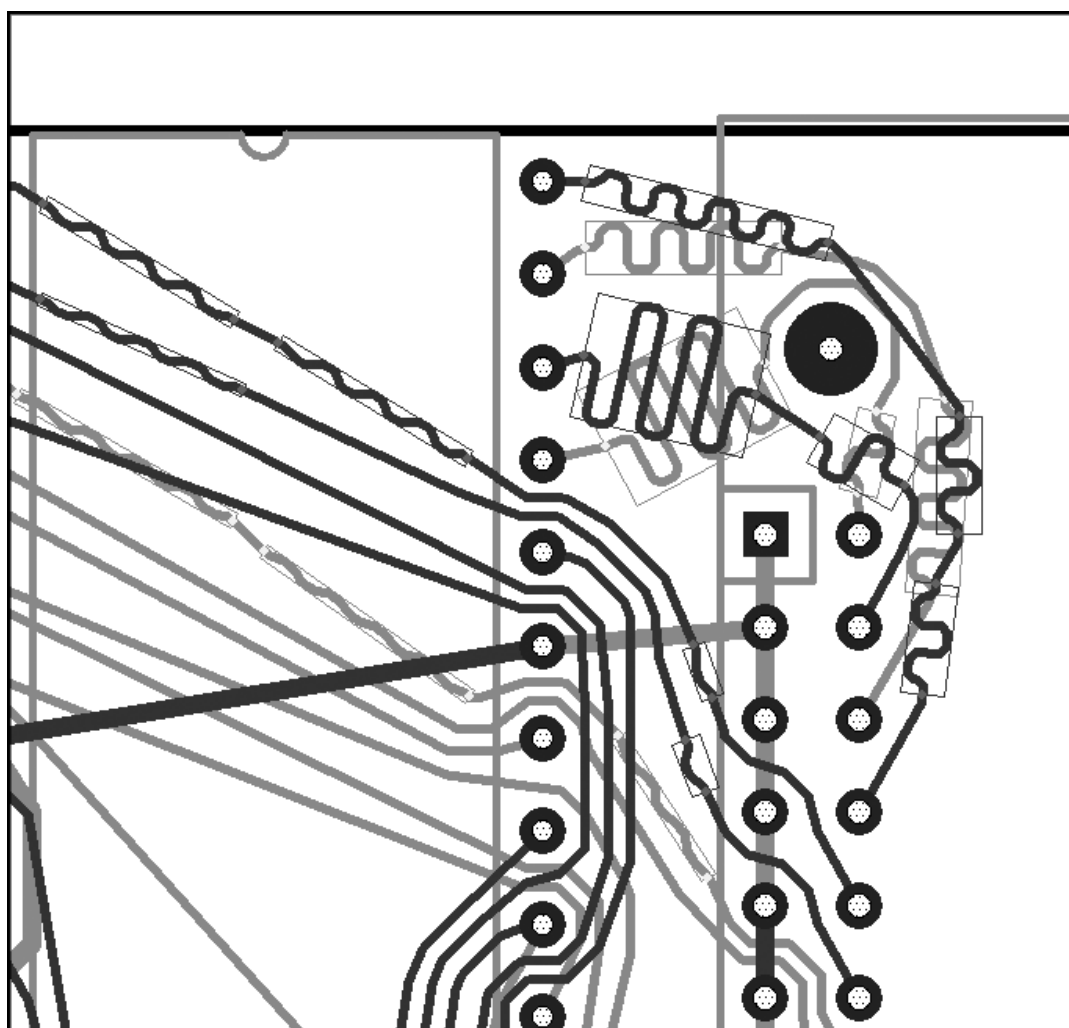


Рис. 6

В отличие от аналогов (например, САПР Expedition фирмы Mentor Graphics, США) разработанные методы, алгоритмы и программные средства обеспечивают эффективную синхронизацию заданных задержек сигналов, большее удобство и простоту при работе проектировщика, а также лучшее качество получаемых решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джонсон Г., Грэхем М. Высокая скорость передачи цифровых данных: высший курс черной магии. М.: Изд. дом «Вильямс», 2005.
2. Лысенко А. А., Полубасов О. Б. Обеспечение заданной длины проводников в САПР Topog // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2009. № 4. С. 3–21.

A. A. Lysenko, Y. T. Lyachek, O. B. Polubasov

AUTOMATIC CREATION OF DELAY LINES IN THE TOPOLOGY OF PCB

An approach to the problem of matching the delay in signal transmission lines on printed circuit boards in a system of flexible topological trace.

PCB, delay lines, delay matching, topological routing, the algorithm will automatically generate

УДК 681.518.5+681.5

*Д. Х. Имаев, Л. Б. Пошехонов,
И. В. Шевцов, М. Ю. Шестопалов*

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИКИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Для сложных динамических систем и технологических процессов выявляются структурные условия обнаружения диагностических признаков на контролируемых выходах и условия локализуемости источника неисправности. Задача решается по модели топологического ранга, инвариантной к классам операторов подсистем и значениям их параметров.

Структурно-сложные системы, технологические процессы, системные свойства, диагностирование, диагностические признаки

Задача обнаружения изменений статических характеристик и недопустимых отклонений динамики подсистем сложного объекта и/или технологического процесса (ТП), свидетельствующих о приближении или появлении неисправности, решается путем анализа сигналов, несущих информацию о диагностических признаках неисправности [1], [2]. Предполагается, что сигнал генерируется самим объектом или является его реакцией на приложенное к его входу тестовое воздействие [2].

В системе со сложной внутренней организацией (топологией) проявление конкретного диагностического признака на определенных выходах может быть различным и опосредованным, что затрудняет или делает невозможным задачу выявления источника неисправности. Целесообразно сформировать предварительный этап исследования модели топологического ранга неопределенности $M(1)$, несущего информацию о внутренней организации системы без конкретизации структур операторов и значений параметров [3], [4]. При этом могут быть выявлены качественные системные свойства, определяющие принципиальную возможность решения задачи и характер преобразования информации в модели динамической системы.

В статье на примере системы подготовки паров тетракарбонила никеля (ТКН), являющейся частью технологического процесса производства никелевого порошка [5], [6], рассматриваются следующие задачи:

1. Подготовка исходной модели первого ранга $M(1)$ в форме S -графа [4]; такая модель позволяет формировать варианты топологии системы, порождаемые различными режимами и условиями функционирования процесса.

2. Реализация компьютерной модели на языке графического редактора программы CLASSiC-3, имеющей режим анализа структурных свойств сложных систем [7].

3. Формирование частной модели одного из множества вариантов топологии системы, предназначенной для решения задачи диагностирования.

4. Топологический анализ необходимых условий обнаружения диагностических сигналов от подсистем на контролируемых выходах системы; исследование маршрутов передачи диагностических сигналов.

5. Формулировка правил решения задачи диагностирования рассматриваемого ТП.

Методология исследований основана на принципах системного подхода к построению моделей, анализу и синтезу сложных систем – последовательного раскрытия неопределенности и избыточности [3].

Содержательное описание и модель технологического процесса. Исследование необходимых системных условий диагностирования объекта иллюстрируется на примере системы подготовки паров тетракарбонила никеля $S_{п.п}$, являющейся частью ТП производства никеля [5], [6]. Принципиальная схема системы $S_{п.п}$ ТКН изображена на рис. 1.

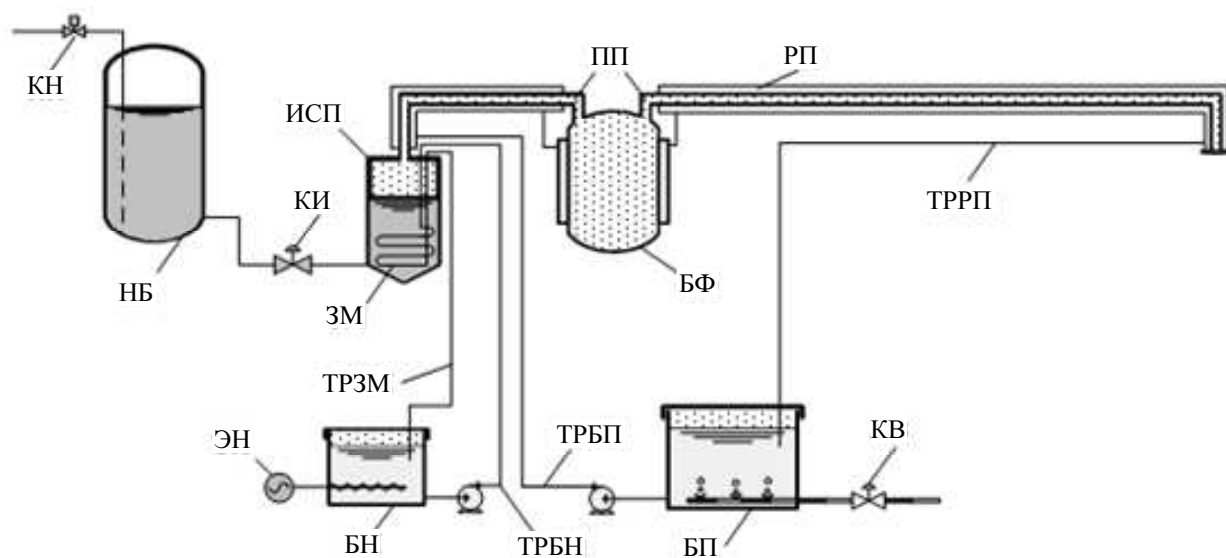


Рис. 1

Состав функциональных подсистем приведен в табл. 1. Перечисление подсистем задает модель нулевого ранга неопределенности $M(0)$ собственно системы [3], [4]. Каждой подсистеме на структурной схеме модели системы $S_{п.п}$ соответствует блок с внутренними связями (рис. 2).

Таблица 1

Обозначение подсистемы на рис. 1	Функциональное назначение подсистемы	Выходная координата, обозначение	Имя и номер блока на рис. 2
НБ	Напорный бак	Уровень жидкой фазы ТКН, $h_{нб}$	НБ, 1
ИСП	Испаритель	Уровень жидкой фазы ТКН, $h_{исп}$	ИСПУ, 2
		Температура жидкой фазы ТКН, $\theta_{исп}$	ИСПТ, 3
БН	Бак электронагрева воды	Температура воды, $\theta_{бн}$	БН, 4
ТРБН	Трубопровод горячей воды от БН к ИСП	Температура воды, $\theta_{трбн}$	ТРБН, 5
ЗМ	Змеевик испарителя	Температура воды, $\theta_{зм}$	ЗМ, 6
ТРЗМ	Трубопровод горячей воды от ЗМ к БН	Температура воды, $\theta_{трзм}$	ТРЗМ, 7
КВ	Блок клапана водяного пара	Расход водяного пара, $g_{вп}$	КВ, 8
БП	Бак подогрева	Температура воды, $\theta_{бп}$	БП, 9
ТРБП	Трубопровод горячей воды от БП	Температура воды, $\theta_{рп}$	ТРБП, 10
БФ	Буферная емкость	Расход паров ТКН, $g_{бф}$	БФР, 15
		Давление паров ТКН, $p_{бф}$	БФД, 16
ПП	Паропровод паров ТКН	Расход паров ТКН, $g_{пп}$	ППР, 17
		Давление паров ТКН, $p_{пп}$	ППД, 18

Связи между подсистемами сформированы в соответствии с описанием ТП. Связи между входными переменными и выходной координатой внутри каждого блока установлены на этапе анализа физических и химических закономерностей. В результате образуется модель первого ранга $M(1)$, как это изображено на рис. 2. В фигурных рамках показаны управляющие и возмущающие воздействия, связывающие систему $S_{п.п}$ со средой на входе: $h_{нбз}$ – задание уровня напорного бака, $u_{нб}$ – положение регулирующего органа напорного бака, $u_{испз}$ – положение регулирующего органа испарителя, θ_{oc} – температура окружающей среды, $i_{бн}$ – сила тока бака электронагрева воды, $\theta_{вп}$ – температура водяного пара рубашки подогрева паропровода, $u_{кв}$ – положение регулирующего органа клапана водяного пара. Связь системы $S_{п.п}$ со средой на выходе задается перечислением выходных координат следующих подсистем: НБ ($h_{нб}$), ИСП ($h_{исп}$, $\theta_{исп}$), ПП ($g_{пп}$, $p_{пп}$), ТРБП ($\theta_{рп}$).

Компьютерная модель системы. Используется специализированная программа CLASSiC-3, имеющая режим анализа структурных свойств сложных систем [7]. Модель на языке графического редактора программы изображена на рис. 3. Нумерация блоков и их входных портов соответствует структурной схеме, изображенной на рис. 2. Входные и выходные порты системы пронумерованы по вертикали.

Результаты идентификации и экспертные оценки специалистов-операторов позволяют пренебрегать некоторыми связями внутри подсистем на разных этапах функционирования ТП, что порождает значительное число вариантов топологии, т. е. множество моделей $M(1)$. Формирование любого конкретного варианта модели $M(1)$ сводится к удалению из исходной модели подмножества связей внутри подсистем.

Следует отметить, что модели топологического ранга позволяют исследовать целый ряд системных свойств, таких, как соответствие передач функциям и целям управления (воспроизведение управляющих воздействий, подавление возмущений), выявление сильных компонентов (автономных контурных частей, отвечающих за собственные движения в динамической системе), определение состава путей, контуров и анализ их взаимного касания [4]. Окно «Навигатор» программы CLASSiC-3 (рис. 3) предназначено для управления процессом ана-

лиза и отображения структурных свойств. Результаты анализа отображаются выделением подмножества соответствующих блоков и связей. В частности, на рис. 3 жирными линиями выделена контурная часть системы – подмножество принадлежащих контурам блоков и связей, а блоки вне контурной части имеют заштрихованное поле.

Программа также содержит функцию удаления выделенных или невыделенных объектов (рис. 4), что позволяет формировать частные избыточные модели при решении конкретной задачи [7].

Анализ системных свойств при решении задачи диагностирования. Далее в качестве примера рассматривается вариант топологии модели системы $S_{п.п.}$ обладающей минимальным набором внутренних связей в подсистемах [5]. Специфика задачи диагностирования в принятой постановке позволяет рассматривать автономную модель системы (без связей с внешней средой на входе). В результате удаления избыточной части исходной модели получаем компьютерную модель, изображенную на рис. 5.

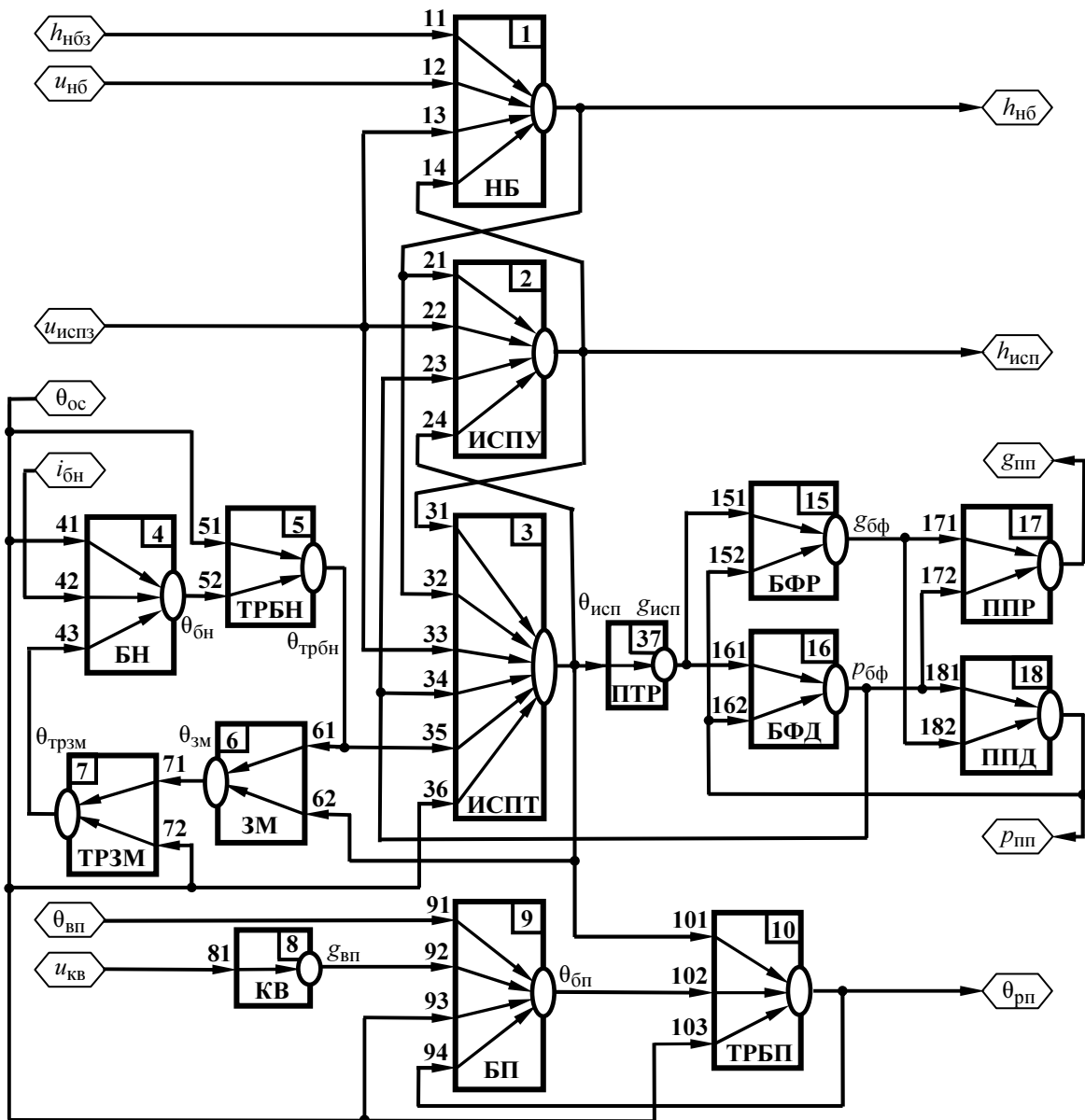


Рис. 2

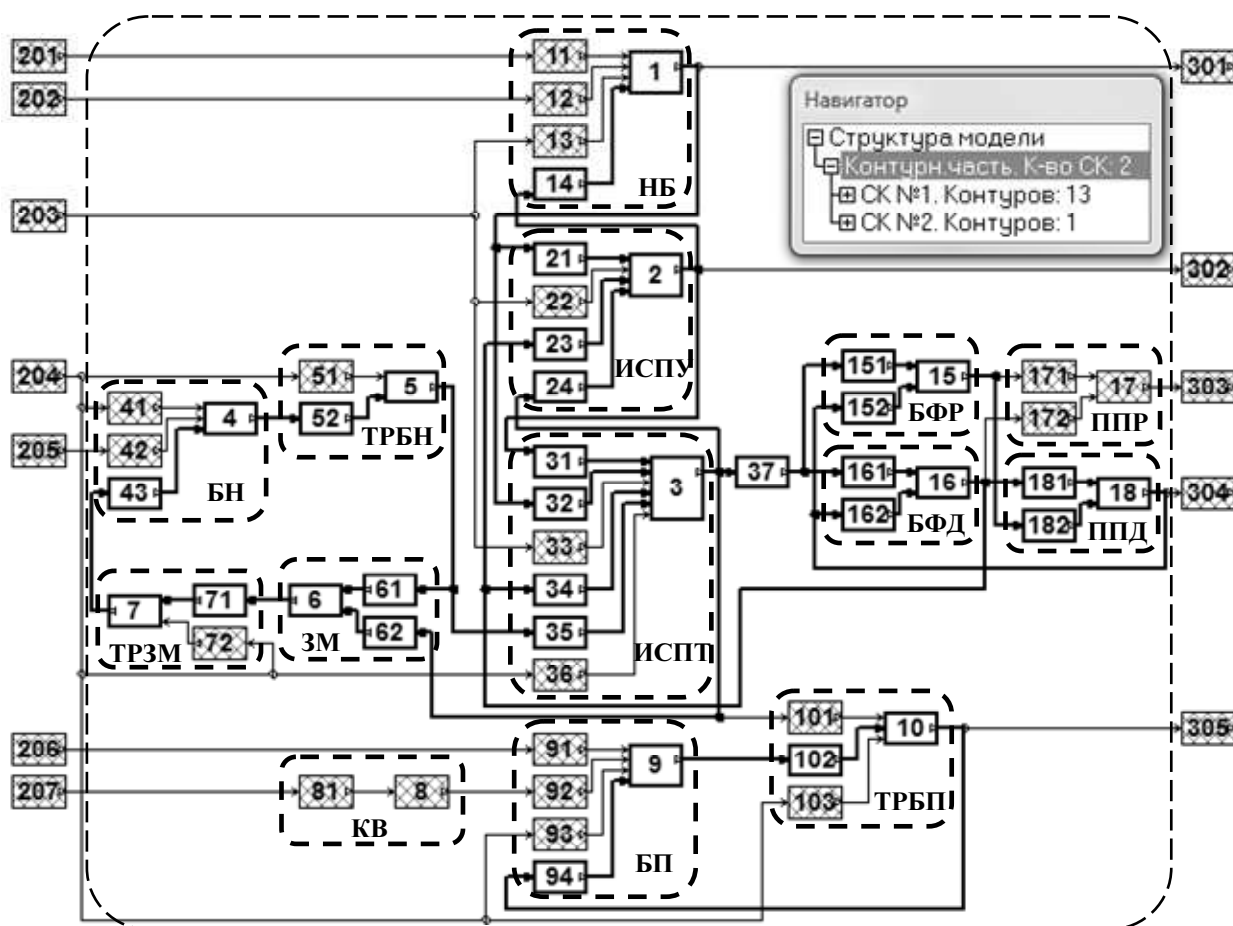


Рис. 3

На схеме выделена контурная часть системы, состоящая из двух сильных компонентов – СК1 и СК2. Компонент СК1 включает подсистему БФ (блоки БФР и БФП) и подсистему ПП (блоки ППР и ППД), а компонент СК2 – подсистему ИСП (блоки ИСПУ и ИСПП).

В режиме анализа структурных свойств программой CLASSic-3 выявляются пути в графе от подсистем к выходам системы, контуры графа, а также отношения касания путей и контуров, принадлежащих выявленным сильным компонентам. Результаты сведены в «расширенную» матрицу достижимостей – таблицу, заполняемую по следующим правилам:

1. Отсутствие пути для назначенной пары вход-выход означает принципиальную невозможность диагностирования подсистемы по конкретному выходу – система имеет нулевой оператор передачи (абсолютная инвариантность выхода), – что при фиксации результатов обозначается символом «0» в соответствующей ячейке таблицы.

2. Наличие пути единичной длины, не касающегося контуров, означает непосредственную передачу без искажения диагностического сигнала на выход [4]. Этой ситуации соответствует символ «1».

3. В остальных случаях в ячейке указывается состав образующих пути блоков, число путей, а также номера сильных компонентов, которых пути касаются.

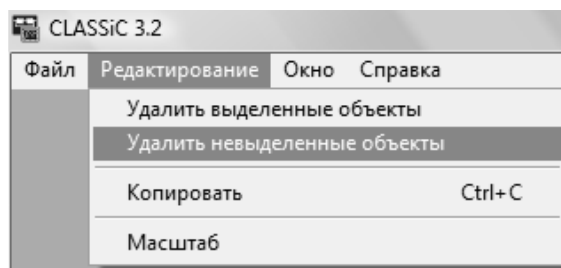


Рис. 4

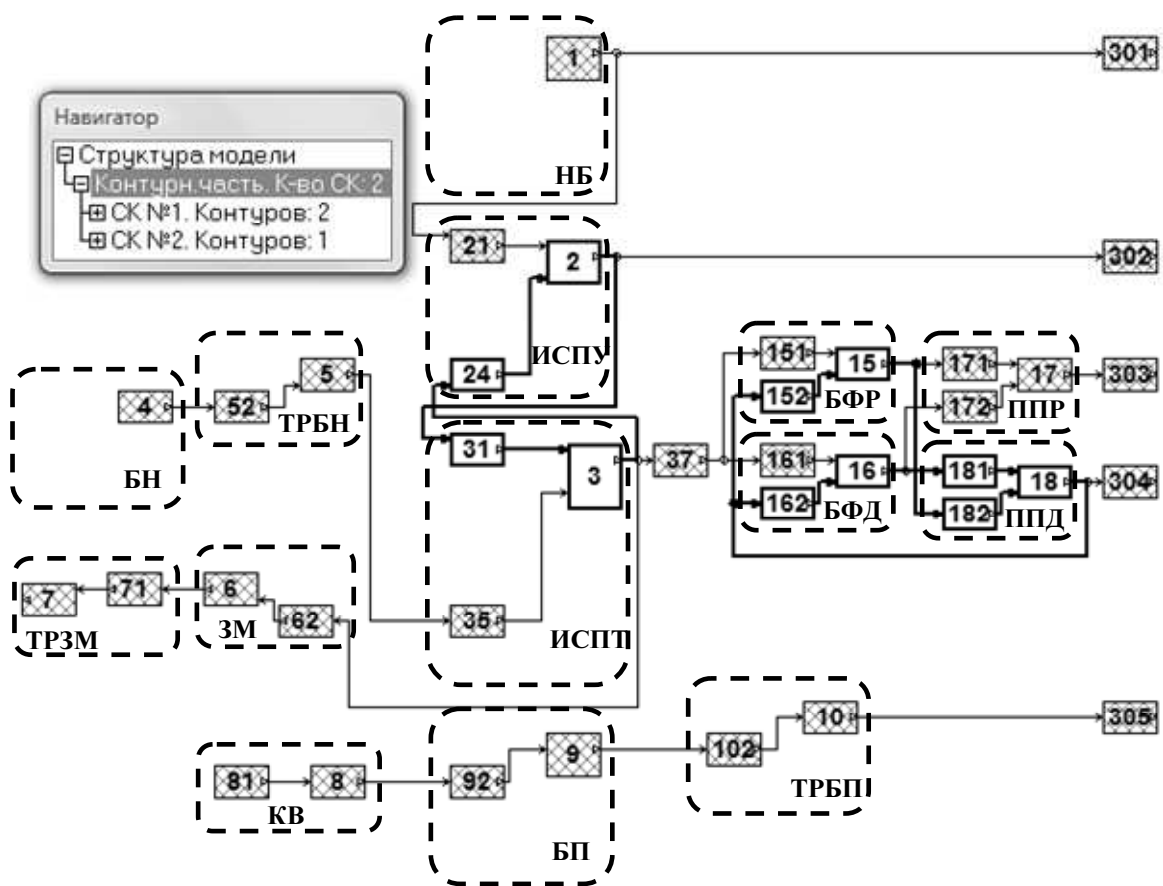


Рис. 5

Таблица 2

Подсистема, номер блока, координата	$h_{нб}$ Порт 301	$h_{исп}$ Порт 302	$g_{пп}$ Порт 303	$p_{пп}$ Порт 304	$\theta_{рп}$ Порт 305
НБ № 1 $h_{нб}$	1	ИСПУ 1 путь СК2 Частная модель – Рис. 6	ИСПУ, ИСПТ, БФП, БФД, ППР, ППД, 4 пути СК1, СК2	ИСПУ, ИСПТ, БФП, БФД, ППР, 2 пути СК1, СК2	0
...					
ЗМ № 6 $\theta_{зм}$	0	0	0	0	0
...					
ТРБП № 10 $\theta_{рп}$	0	0	0	0	1
БФР № 15 $g_{бф}$	0	0	БФР, БФД, ППР, ППД 2 пути СК1	ППД, 1 путь СК1 Частная модель – Рис. 7	0
...					
ППР № 17 $g_{пп}$	0	0	1	0	0

Фрагменты результатов анализа представлены в табл. 2.

В соответствии с принципом избыточности для каждой передачи формируется своя частная модель. Например, для анализа прохождения сигнала от подсистемы НБ к выходному порту 302 (координата $h_{исп}$) сформированная частная модель изображена на рис. 6.

Анализ прохождения диагностического сигнала от блока ПТД к выходному порту 304 (координата $p_{\text{пт}}$) проводится по частной избыточной модели (рис. 7).

Результаты анализа удобно представить в виде так называемого двудольного графа, иллюстрирующего отображение достижимостей между диагностируемыми подсистемами и выходами системы (рис. 8).

В исследуемой системе в матрице достижимостей 44 ячейки имеют индекс «0», а двудольный граф (рис. 8) имеет 26 дуг, отвечающих передачам, подлежащим дальнейшему исследованию. Для них сделаем ряд выводов:

1. Имеются две подсистемы – ЗМ и ТРЗМ, диагностирование которых принципиально невозможно (по исследуемому варианту топологии модели). Сигнал, несущий информацию о диагностических признаках неисправностей этих подсистем, не проявится ни на одном из выходных портов.

2. Сигналы с диагностическими признаками состояния подсистемы НБ непосредственно появляются на выходе 301. Несмотря на то, что диагностический признак подсистемы НБ в преобразованном виде проявится также и на портах 302, 303, 304, подсистема НБ диагностируема.

3. Диагностический признак подсистемы ППР появляется только на выходе 303. Однако на этот порт также попадают преобразованные сигналы от восьми других подсистем.

4. Сигналы от подсистем КВ, БП и ТРБП проявляются только на выходе 305; кроме того, на этот порт не попадают сигналы от остальных подсистем. Точное определение источника диагностического сигнала среди КВ, БП и ТР-3 должно производиться по самим диагностическим признакам.

5. В остальных случаях диагностические признаки проявляются на нескольких выходных портах, и наоборот, один выход может проявить сигналы от нескольких источников. В этой ситуации по модели топологического ранга $M(1)$ задача точного обнаружения источника диагностического признака не имеет решения.

Таким образом, структурный анализ позволяет повысить эффективность и достоверность решения задачи диагностики сложных объектов. Последовательное раскрытие неопределенности и формирование ча-

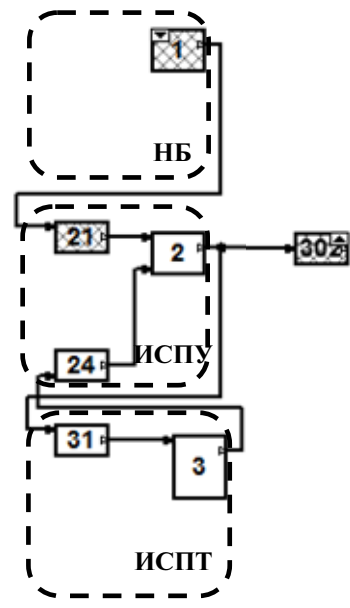


Рис. 6

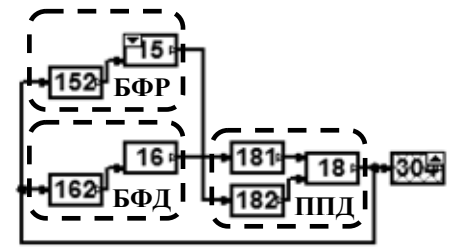


Рис. 7

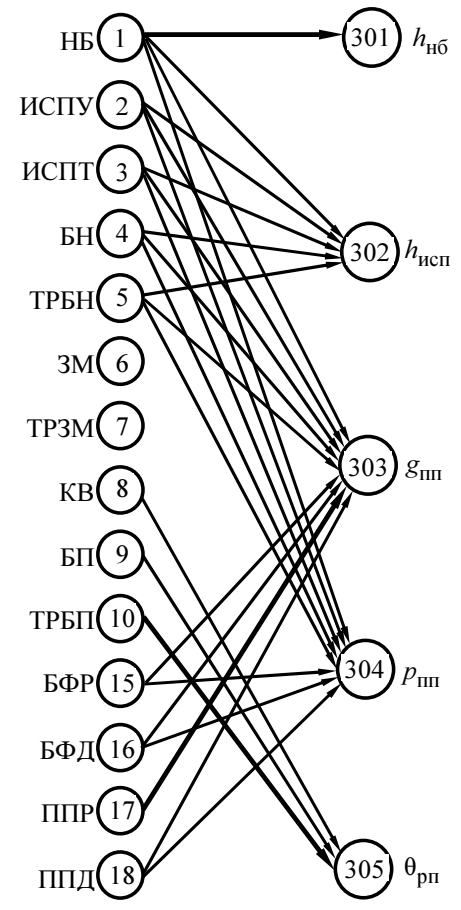


Рис. 8

стных избыточных моделей, содержащих информацию топологического ранга, позволяет провести анализ «объяснительного типа» и существенно сократить объемы дальнейших вычислений при доопределении модели структурой операторов (ранг $M(2)$) и значениями параметров (ранг $M(3)$).

В рассмотренном примере структурно-сложной системы для ряда ситуаций точное распознавание источника неисправности по модели топологического ранга невозможно, а по модели параметрического ранга, учитывающей характеристики диагностируемого сигнала, затруднено из-за прохождения его через другие подсистемы и контурную часть. В такой ситуации целесообразно рассмотреть возможность расположения дополнительных датчиков для контроля сигнала непосредственно на выходах диагностируемых подсистем и блоков. Однако принадлежность подсистемы контурной части означает, что выходной сигнал подсистемы оказывается преобразованным действием контуров.

Изменение режимов и условий функционирования рассматриваемого ТП порождает множество моделей $M(1)$, различающихся системными свойствами; каждой из таких моделей соответствует своя картина проявления на выходах системы диагностических сигналов от подсистем.

При обработке результатов исследования множества всех ситуаций представляется целесообразным использование процедур кластерного анализа и экспертных оценок с целью формирования системы правил, устанавливающих соответствие выявленных условий диагностирования подсистем режимам и условиям функционирования системы [1], [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев А. А., Кораблев Ю. А., Шестопалов М. Ю. Идентификация и диагностика систем: Учеб. М.: Издательский центр «Академия», 2009.
2. Алексеев А. А., Кораблев Ю. А., Шестопалов М. Ю. Методы управления и диагностики в технических системах с применением нечеткой логики. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008.
3. Вавилов А. А. Структурный и параметрический синтез сложных систем / ЛЭТИ. Л., 1979.
4. Вавилов А. А., Имаев Д. Х. Машинные методы расчета систем управления. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981.
5. Шевцов И. В., Шестопалов М. Ю. Моделирование ТП разложения паров тетракарбонила никеля // Сб. докл. 11-й междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям SCM'2008, СПб., 25-27 июня 2008 г. Т.1. С. 100–102.
6. Имаев Д. Х., Шевцов И. В., Шестопалов М. Ю. Разработка и исследование моделей ТП генерации паров ТНК как объектов управления // Сб. докл. 12-й междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям SCM'2009, СПб., 25-27 июня 2009 г. Т. 2. С. 59–65.
7. Пошехонов Л. Б. Специализированное программное средство CLASSiC-3 для расчета структурно-сложных систем управления // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. «Информатика, управление и компьютерные технологии». 2002. Вып. 3. С. 95–100.

D. H. Imaev, L. B. Poshekhonov, I. V. Shevtsov, M. Y. Shestopalov

STRUCTURAL ANALYSIS COMPLEX SYSTEMS DIAGNOSTIC PROBLEMS

For complex dynamic systems and technological processes are identified structural conditions to detect the diagnostic features on the controlled outputs and conditions of error source localizability. The task is solved according to the model of the topological rank, invariant to subsystems operators' classes and their parameter.

Structurally complex systems, technological processes, system attributes, technical diagnosis, diagnostic features



УДК 62-83-523(62.50)

В. В. Путов, В. Н. Шелудько, А. В. Путов, Е. В. Друян

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТОРМОЖЕНИЕМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДВИЖИТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ КОЛЕС С ПНЕВМАТИЧЕСКИМИ ШИНАМИ

Рассмотрено построение управляемых электромеханических движителей колес, выполненных на базе синхронных и асинхронных электрических машин; предлагается математическая модель динамики тормозящего колеса, учитывающая упругость пневматика и сухое трение; строится и исследуется адаптивная система управления торможением транспортного колеса, обеспечивающая подавление упругих деформаций пневматика и повышение эффективности торможения.

Торможение транспортного колеса, учет упругости пневматика, сухое трение, адаптивная система управления, сокращение тормозного пути

В статье рассматривается повышение средствами адаптивного управления эффективности тормозных режимов управляемых электромеханических движителей транспортных колес с пневматическими шинами в условиях экстренного торможения электромобилей. Это актуально также и при создании эффективных антиюзковых систем торможения колес авиашасси при посадке воздушных судов в экстремальных погодных условиях, поскольку самолеты при посадке тормозят именно колесами.

Обобщенная функциональная схема торможения транспортного колеса с электромеханическим движителем. Данная схема (рис. 1) состоит из транспортного колеса (ТК), нагруженного нормальной силой $F_{\text{норм}}$ и соединенного с его ступицей через редуктор (Ред) движителя, выполненный на базе бесколлекторной электрической машины переменного тока (синхронной с индуктором на постоянных магнитах или асинхронной с короткозамкнутым ротором и управляемым источником реактивной энергии), работающей в режиме тормозного генератора (ТГ).

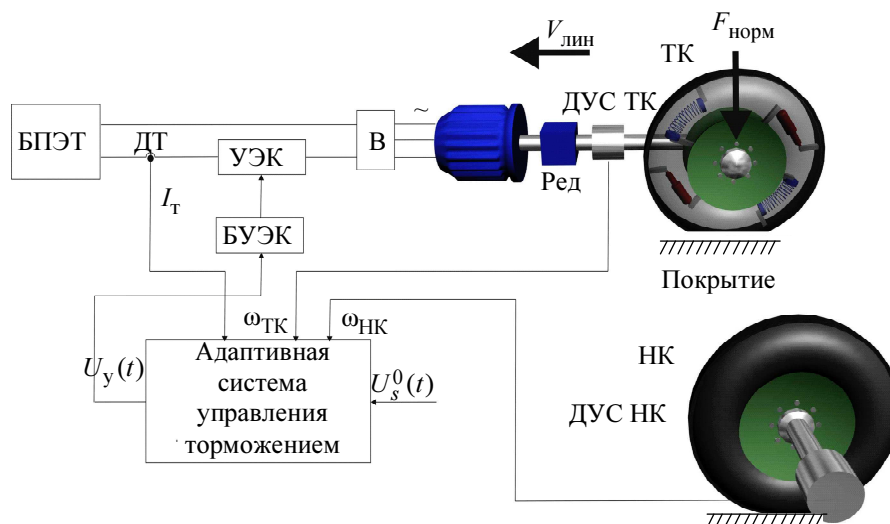


Рис. 1

Трехфазная обмотка статора электрической машины подключена через трехфазный выпрямитель (В) к блоку преобразования энергии торможения (БПЭТ) (аккумуляторной батарее, батарее конденсаторов (ионисторов) или нагрузочному сопротивлению R_H). В цепь выпрямленного тока торможения I_T включены датчик тока (ДТ) и управляемый электронный ключ (УЭК); датчики угловых скоростей ДУС НК и ДУС ТК измеряют угловые скорости $\omega_{НК}$ и $\omega_{ТК}$ свободно катящегося несущего колеса (НК) и ТК, выходы обоих датчиков угловых скоростей. Датчики тока и вход сигнала программного управления $U_s^0(t)$ соединены со входами адаптивной системы управления торможением (скольжением) (АСУТ), а выход АСУТ, вырабатывающий сигнал управления $U_y(t)$, соединен с блоком управления электронным ключом (БУЭК), который управляет включением-выключением УЭК, осуществляя широтно-импульсную модуляцию выпрямленного тока I_T и тем самым управляя моментом торможения двигателя, приложенным к ступице ТК и пропорциональным силе торможения, замедляющей движение транспортного средства.

Математическая модель динамики торможения транспортного колеса с электромеханическим двигателем, учитывающая особенности скольжения пневматической шины по покрытию. Постановка задачи адаптивного управления. Для описания характеристики трения скольжения транспортного колеса с пневматической шиной, нагруженного нормально приложенной к его оси вращения силой $F_{норм}$, вводят понятия сухого, кулонова и жидкостного видов трения, формирующих совокупную характеристику трения скольжения [1]. Качение тормозящего транспортного колеса по сухому гладкому покрытию носит неравномерный «срывной» характер, и колесо движется толчками, которые при определенных условиях приобретают периодический характер так называемых фрикционных автоколебаний. Этот эффект исследован и описан Штрибеком (1902 г.) и назван его именем [2]. В зоне контакта сжатых с некоторой постоянной силой $F_{норм}$ сухих трущихся поверхностей при попытке их сдвига момент трения покоя сначала возрастает до некоторого максимального значения – силы страгивания F_{max} , соответствующей

моменту начала пробуксовки (страгивания), а после начала движения резко падает до силы трения скольжения (кулоновой силы трения, пропорциональной силе прижатия), на некотором участке остается постоянным, затем начинает постепенно возрастать в соответствии с законом Рейнольдса для жидкостного трения [2].

На рис. 2 показан типичный вид графиков зависимости коэффициента сцепления $\mu(S_{\text{ТК}})$ от скольжения $S_{\text{ТК}}$ транспортного колеса по сухому, влажному и скользкому покрытию при постоянной силе прижатия $F_{\text{норм}} = \text{const}$.

Рассмотрим приближенное математическое описание кривых $\mu(S_{\text{ТК}})$, изображенных на рис. 2. Отметим на рис. 2 (кривая 2) характерные точки, соответствующие трем значениям коэффициента сцепления: ($\mu = \mu_{\text{max}}, S_{\text{ТК}} = 0$); ($\mu = \mu_{\text{min}}, S_{\text{ТК}} = S_{\text{ТК min}}$); ($\mu = \mu_{\text{blok}}, S_{\text{ТК}} = 1.0$). Силу трения (скольжения), приложенную к измерительному колесу в зоне контакта, вычислим по формуле

$$F_{\text{тр}}(\cdot) = \mu(\cdot) F_{\text{норм}},$$

и тогда момент трения скольжения $M_{\text{тр}}$ измерительного колеса вычисляется по формуле

$$M_{\text{тр}}(\cdot) = 9.81 \mu(\cdot) i_{\text{ик}}^{-1} R_{\text{ТК}} F_{\text{норм}} \eta_{\Sigma} = m_f \mu(\cdot);$$

где $m_f = 9.81 i_{\text{ик}}^{-1} R_{\text{ТК}} F_{\text{норм}} \eta_{\Sigma}$, $F_{\text{норм}} = \text{const}$; $R_{\text{ТК}}$ – радиус ТК; $i_{\text{ик}}$ – передача редуктора; η_{Σ} – КПД трансмиссии.

Аналитическую зависимость коэффициента сцепления, приблизительно учитывающую эффект Штрибека сухого трения, кулоново и жидкостное трение, определим следующим выражением:

$$\mu(S_{\text{ТК}}) = M_3 \exp(-M_2 S_{\text{ТК}}) + M_1 S_{\text{ТК}} + M_0,$$

где коэффициенты M_0, M_1, M_2, M_3 определяются по характерным точкам кривой $\mu(S_{\text{ТК}})$:

$$M_0 = \mu_{\text{min}}; M_1 = \mu_{\text{blok}} - \mu_{\text{min}}; M_2 = \frac{d}{S_{\text{min}}}; M_3 = \mu_{\text{max}} - \mu_{\text{min}};$$

числовой коэффициент d определяет крутизну кривой в зоне действия эффекта Штрибека ($d = 3 \dots 100$).

Соответственно, математическую модель момента трения $M_{\text{тр}}(\cdot)$ (момента сцепления) транспортного колеса, учитывающую эффект Штрибека сухого трения, кулоново и жидкостное трение, можно представить в виде

$$M_{\text{тр}}(\cdot) = m_f (M_3 \exp(-M_2 S_{\text{ТК}}) + M_1 S_{\text{ТК}} + M_0).$$

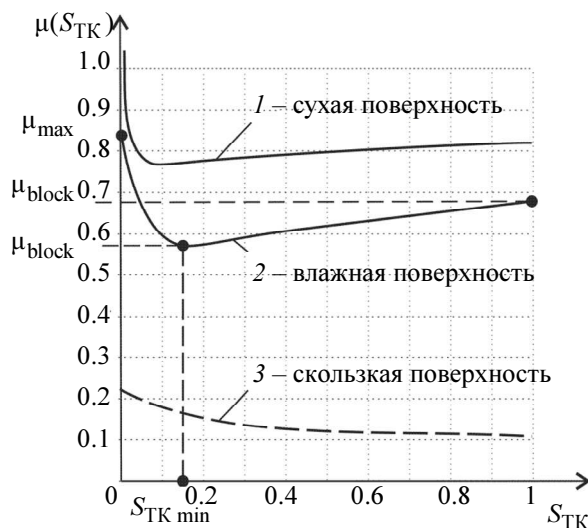


Рис. 2

Рассмотрим математическую модель динамики транспортного колеса, учитывающую эффект Штрибека сухого трения, кулоново и жидкостное трение и упругие деформации пневматика. Будем учитывать упругие свойства пневматической шины, возникающие при передаче момента торможения от ступицы транспортного колеса (см. рис. 1) через упругие внутренние элементы шины на ее обод, состоящий из элементов шины, жестко связанных с перемещающимся по ее внешней окружности «пятном» контакта. При составлении математической модели (дифференциальных уравнений) динамики торможения транспортного колеса введем два диска с моментами инерции $J_{об}$, учитывающего инерционные массы обода шины, и $J_{ст}$, учитывающего инерционные массы ротора тормозного генератора и жестко соединенной с ним ступицы транспортного колеса с частью массы пневматика. Упругие деформации пневматика шины будем учитывать соединяющей диски $J_{ст}$ и $J_{об}$ невесомой упругой связью с коэффициентом упругости $P_{пн}$, полагая, что в общем случае параметры $J_{ст}(\cdot)$, $J_{об}(\cdot)$, $P_{пн}(\cdot)$, δ , $M_{тр}(\cdot)$ являются неопределенными нелинейными функциями, зависящими от величины скольжения, коэффициента сцепления (т. е. состояния покрытия), прижимной силы, состояния шины и других неучтенных факторов; введем m_y – упругий момент, возникающий при деформации шины, и угловые скорости $\omega_{об}$ и $\omega_{ст}$ дисков с моментами инерции $J_{об}(\cdot)$ и $J_{ст}(\cdot)$, а также учтем зазор в механической трансмиссии (δ – половина зазора).

Запишем дифференциальные уравнения динамики электромеханической системы торможения транспортного колеса, изображенной на рис. 1, в следующем виде:

$$\dot{M}_\Gamma = k_M L_\Gamma^{-1} = \left[k_e R_{ТК}^{-1} v_0 (1 - S_{ст}) - U_{УЭП} \right] - L_\Gamma^{-1} R_\Sigma M_\Gamma, \quad (1)$$

или если $L_\Gamma = 0$, то

$$M_\Gamma = \frac{k_M k_e v_0}{R_\Sigma R_{ТК}} (1 - S_{ст}) - \frac{k_M}{R_\Sigma} U_{УЭП}; \quad (1)$$

$$U_{УЭП} = k_{УЭП} U_s; \quad U_s = \beta_s (U_s^0 - k_s S_{ст}); \quad (2)$$

$$\dot{S}_{ст} = \frac{R_{ТК}}{v_0 J_{ст}} (-m_y + M_\Gamma); \quad (3)$$

$$\dot{S}_{об} = \frac{R_{ТК}}{v_0 J_{об}} (-M_{тр}(\cdot) + m_y); \quad (4)$$

$$\dot{m}_y = P_{пн} \frac{v_0}{R_{ТК}} (S_{об} - S_{ст}). \quad (5)$$

$$f_y = \begin{cases} m_y - P_{пн} \delta, & m_y \geq P_{пн} \delta; \\ 0, & |m_y| < P_{пн} \delta; \\ m_y + P_{пн} \delta, & m_y \leq -P_{пн} \delta; \end{cases} \quad (6)$$

$$M_{тр}(\cdot) = m_f \mu = m_f \mu(S_{ст}),$$

или

$$M_{тр}(\cdot) = m_f \mu(S_{ст}) = m_f \left[M_3 \exp(-M_2 S_{ст}) + M_1 S_{ст} + M_0 \right]. \quad (7)$$

В уравнениях (1)–(7) обозначены: $R_{\Sigma} = R_{\text{я}} + R_{\text{н}}$, $R_{\text{я}}$ – сопротивление якорной цепи; $k_{\text{м}}, k_{\text{е}}, k_{\text{я}}$ – конструктивные параметры электрической машины (генератора); $\omega_{\text{б}} = \omega_{\text{НК}}$ – угловая скорость свободно катящегося колеса, $\omega_{\text{б}} = R_{\text{К}}^{-1}v_0$; $v_0 = \text{const}$ – линейная скорость электромобиля (воздушного судна); $R_{\text{ТК}}$ – радиус транспортного колеса; $U_{\text{с}}, \beta_{\text{с}}$ – выходной сигнал и коэффициент усиления контурного регулятора скольжения; $M_{\Gamma} = k_{\text{м}}I_{\Gamma}$ – электромагнитный момент генератора; $U_{\text{УЭП}}$ – условное напряжение, пропорциональное сигналу управления $U_{\text{у}}$, изменяющему скважность управляемого электронного переключателя УЭП в цепи выпрямленного тока статора синхронного генератора; $S_{\text{ст}}, S_{\text{об}}$ – скольжения, рассчитываемые по формулам:

$$S_{\text{ст}} = \frac{\omega_{\text{б}} - \omega_{\text{ст}}}{\omega_{\text{б}}}; \quad S_{\text{об}} = \frac{\omega_{\text{б}} - \omega_{\text{об}}}{\omega_{\text{б}}}.$$

Остальные обозначения введены ранее.

Задачу управления торможением транспортного колеса в силу неопределенности параметров и нелинейности построенной математической модели (1)–(7) целесообразно решать в рамках адаптивного подхода [3] и строить адаптивную систему управления скольжением транспортного колеса $S_{\text{ТК}} = S_{\text{ст}}$, обеспечивающую подавление средствами управления упругих свойств пневматика и тем самым приближение динамического поведения тормозящего колеса с упругим пневматиком («упругого» колеса) к поведению тормозящего колеса с жестким пневматиком («жесткого» колеса), все зависимости коэффициента трения которого на поверхностях с сухим, кулоновым и жидкостным тернием характеризуются максимумами при значениях скольжения, близких к нулю (0+0).

Адаптивная система управления торможением транспортного колеса с электромеханическим двигателем. В соответствии с поставленной выше задачей управления и следуя [3], для нелинейного упругого электромеханического объекта (1), (2)–(7) построим прямую беспойсковую (аналитическую) адаптивную систему с параметрической настройкой и мажорирующими функциями нелинейной параметризации неизвестных нелинейных функций $J_{\text{ст}}(\cdot), J_{\text{об}}(\cdot), p_{\text{пн}}(\cdot), \delta, M_{\text{тр}}(\cdot)$. Учтем также, что объект (1), (2)–(7) не полностью измерим (измерению с помощью датчиков доступна только его переменная $\omega_{\text{ст}} = \omega_{\text{ТК}}$), поэтому для реализации аналитических адаптивных алгоритмов и модального управления введем стационарный наблюдатель (асимптотический идентификатор состояния объекта (1), (2)–(7)). Кроме того, с целью понижения на единицу порядка дифференциальных уравнений данного объекта пренебрежем электромагнитной инерцией ($L_{\text{я}}$) и заменим дифференциальное уравнение (1) алгебраическим уравнением (1').

Таким образом, имеем объект (1')–(7) третьего порядка с вектором состояния $\mathbf{x} = (\omega_{\text{ст}}, m_{\text{у}}, \omega_{\text{об}})^{\text{T}}$, или $\mathbf{x} = (S_{\text{ст}}, m_{\text{у}}, S_{\text{об}})$, переменная $\omega_{\text{ст}} = \omega_{\text{ТК}}$ доступна измерению с помощью датчика ДУС ТК, производные скольжений в уравнениях (1), (2)–(7) связаны соотношениями $\dot{\omega}_{\text{ст}} = -\omega_{\text{б}}\dot{S}_{\text{ст}}$, $\dot{\omega}_{\text{об}} = -\omega_{\text{б}}\dot{S}_{\text{об}}$, $\omega_{\text{б}} = R_{\text{ТК}}^{-1}v_{\text{лин}}$. Неопределенными парамет-

рами и функциями объекта (1)–(7) являются $J_{\text{CT}}(\cdot)$, $J_{\text{об}}(\cdot)$, $p_{\text{пн}}(\cdot)$, δ , $M_{\text{тр}}(\cdot)$. В соответствии с методикой, изложенной в [3], построенная адаптивная система будет содержать следующие подсистемы, представленные в виде дифференциальных или алгебраических уравнений, записанных для краткости с помощью векторов и матриц соответствующих размерностей (в данном случае 3×1 и 3×3):

а) идентификатор состояния (наблюдатель) третьего порядка вида

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}_0 \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{l} \mathbf{c}^T (\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}) + \mathbf{b}_0 u_{\Sigma}; \quad (8)$$

б) модальный регулятор (линейная обратная связь) по вектору оценки состояния $\hat{\mathbf{x}} = (\hat{\omega}_{\text{CT}}, \hat{m}_y, \hat{\omega}_{\text{об}})^T$ вида

$$u_{\text{л}} = \mathbf{k}^T \hat{\mathbf{x}} = k_1 \hat{\omega}_{\text{CT}} + k_2 \hat{m}_y + k_3 \hat{\omega}_{\text{об}}; \quad (9)$$

в) эталонную модель в «физических переменных» вида

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_{\text{М}} &= \mathbf{A}_{\text{М}} \mathbf{x}_{\text{М}} + \mathbf{b}_{\text{М}} u_{\text{с}}^0, \\ \mathbf{A}_{\text{М}} &= \mathbf{A}_0 + \mathbf{b}_0 \mathbf{k}^T, \\ \mathbf{x}_{\text{М}} &= (\omega_{\text{CT}}^{\text{М}}, m_y^{\text{М}}, \omega_{\text{об}}^{\text{М}})^T; \end{aligned} \quad (10)$$

г) закон адаптивного управления вида

$$u_{\text{а}}(t) = \mathbf{k}_{\text{А}}(t) \mathbf{diag} \{ f_p(\hat{x}_r) \}_1^3 \hat{\mathbf{x}} + k_b(t) u_{\text{с}}^0(t) \quad (11)$$

д) алгоритмы параметрической настройки закона адаптивного управления (11) вида

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{k}}_{\text{А}}(t) &= -\gamma_a \delta(\hat{\mathbf{e}}) \hat{\mathbf{x}}^T \mathbf{diag} \{ f_p(\hat{x}_r) \}_1^3 - \lambda_a \mathbf{k}_{\text{А}}(t), \quad r = \overline{1, 6}; \\ \dot{k}_b(t) &= -\gamma_b \delta(\hat{\mathbf{e}}) u_{\text{с}}^0(t) - \lambda_b k_b(t), \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где $\delta(\hat{\mathbf{e}}) = \mathbf{b}_{\text{М}}^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{e}}$; $\hat{\mathbf{e}} = \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}_{\text{М}}$, а мажорирующие функции, содержатся в диагональной матрице вида

$$\mathbf{diag} \{ f_p(\hat{x}_r) \}_1^3 = \mathbf{diag} \{ \hat{\omega}_{\text{об}}^p, \hat{m}_y^p, 1 \}. \quad (13)$$

В уравнениях (8)–(13) адаптивной системы приняты следующие обозначения (кроме введенных ранее): \mathbf{c} – (3×1) вектор измерений; \mathbf{l} , \mathbf{k} – (3×1) – векторы обратных связей наблюдателя и модального регулятора; \mathbf{A}_0 , \mathbf{b}_0 – постоянные (3×3) и (3×1) – матрицы состояния и входа, характеризующие некоторое стационарное линейризованное приближение объекта (1)–(7) с некоторыми усредненными параметрами, соответствующими какому-нибудь установившемуся режиму торможения (например, с программным скольжением $S_{\text{прог}}^0 = 0.1$ и $v_{\text{лин}} = 60$ км/ч); $\mathbf{A}_{\text{М}}$, $\mathbf{b}_{\text{М}}$ – (3×3) и (3×1) – матрицы эталонной модели ($\mathbf{A}_{\text{М}}$ – гурвицева); $\mathbf{k}_{\text{А}}$, k_b – настраиваемые параметры ((1×3) – матрица-строка и скаляр) закона адаптивного управления; \mathbf{P} – матрица – решение уравнения Ляпунова вида

$$\mathbf{A}_M^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_M = -\mathbf{G},$$

где \mathbf{G} – симметричная ($\mathbf{G} = \mathbf{G}^T$) положительно определенная матрица; p – степень мажорирующих функций ($p = 1, 2, \dots$); $u_\Sigma(t) = u_y(t) = u_d(t) + u_a(t) + u_s^0(t)$ – составное управление, вырабатываемое адаптивной системой (8)–(13) для управления процессами торможения пневматического транспортного колеса с электромеханическим двигателем.

Результаты исследования моделированием эффективности построенной адаптивной системы торможения транспортного колеса с электромеханическим двигателем. Рассмотрим некоторые результаты исследования построенной адаптивной системы (8)–(13) управления электромеханическим объектом (1)–(7) моделированием с помощью визуальной системы Simulink (рис. 3–6).

На каждом из рис. 3–6 показаны графики процессов торможения (скольжения $S(t)$) колеса при реакции на ступенчатое входное воздействие $u_S^0 = 0.1$ ($S_{\text{прог}}^0 = 0.1$) при постоянном (кривая 1) и срывном (кривая 2) характерах момента трения ТК с упругим пневматиком и сухим трением и при условии, что транспортное средство движется по гладкой однородной поверхности с коэффициентом сцепления $\mu = 0.7$ (сухой асфальт):

– рис. 3 – результаты моделирования в неадаптивной системе с модальным управлением: при изменении упругости пневматика в четыре раза $p_{\text{пн}} = 0.25 p_{\text{пн}}^0$;

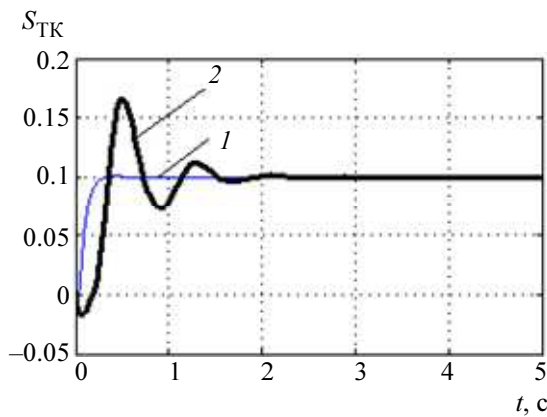


Рис. 3

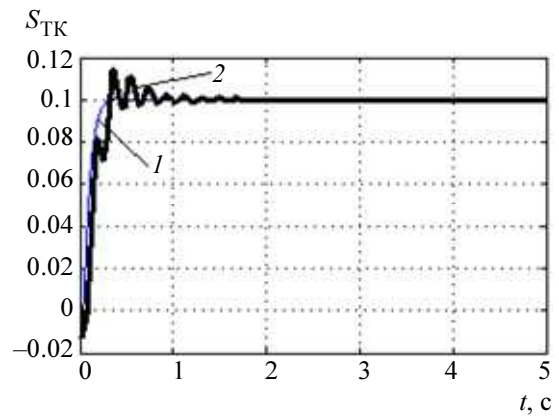


Рис. 4

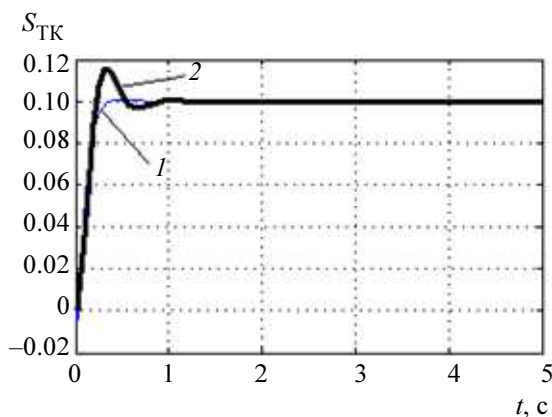


Рис. 5

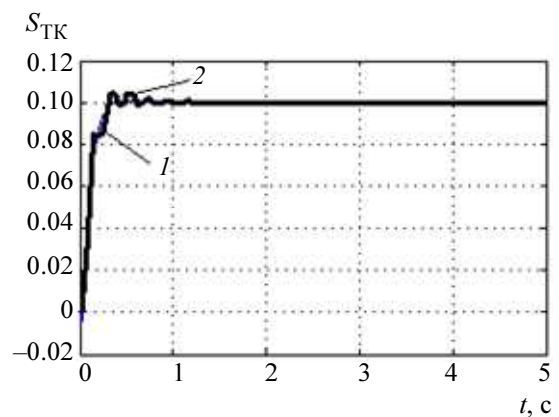


Рис. 6

– рис. 4 – результаты моделирования в неадаптивной системе с модальным управлением: при изменении момента инерции присоединенных масс к измерительному колесу в четыре раза ($J_{сг} = 4J_{сг}^0$);

– рис. 5 – результаты моделирования в системе с адаптивным управлением: при изменении упругости в четыре раза ($p_{пн} = 0.25 p_{пн}^0$);

– рис. 6 – результаты моделирования в системе с адаптивным управлением: при изменении момента инерции присоединенных масс к ИК в четыре раза ($J_{тг} = 4J_{тг}^0$).

Таким образом, исследования показывают высокую эффективность построенной адаптивной системы в принудительном подавлении упругих деформаций пневматика в задаче управления торможением транспортного колеса с электромеханическим двигателем, что обеспечивает при соответствующем выборе достаточно малых программных значений скольжения $S_{прог}^0 = 0.03...0.05$, повышение эффективности торможения и соответствующее снижение величины тормозного пути при любом состоянии автодорожных или аэродромных покрытий.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кибец И. Н., Кибец В. Н. Физика: Справочник. Харьков: Фолио, 1997. С. 43–44.
2. Первозванский А. А. Трение – сила знакомая, но таинственная // Соросовский образовательный журнал, 1998. № 2. С. 129–134.
3. Путов В. В., Шелудько В. Н. Адаптивные и модальные системы управления многомассовыми нелинейными упругими механическими объектами. СПб.: ООО «Техномедиа»; Элмор, 2007. 244 с.

V. V. Putov, V. N. Sheludko, A. V. Putov, E. V. Druyan

ADAPTIVE CONTROL SYSTEM FOR ELECTROMECHANICAL BRAKING VEHICLE PROPELLER

The problems of constructing controlled electro-mechanical propulsion of the wheels, made on the basis of synchronous and asynchronous the electric machines, the mathematical model of the dynamics of the stopping-zyashego wheel, taking into account the elasticity of the pneumatic and dry friction strictly-structured and investigated adaptive braking control a transport wheel that provides suppression elastic deformations of pneumatic topic, improving braking performance.

Inhibition of the transport wheels, pneumatic accounting elasticity, dry friction, adaptive control system, reducing the braking distance



УДК 667.6

*В. Д. Гончаров, Д. С. Самсонов,
И. Е. Грачева, В. А. Мошников, Е. М. Фискин*

ТЕХНОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ АДГЕЗИИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Предложен новый способ повышения адгезии полимерных материалов, основанный на комплексном воздействии, которое оказывает на поверхность полимера плазменный сгусток, движущийся между протяженными электродами, в собственном магнитном поле. Разработана экспериментальная установка для модификации поверхности. Результаты экспериментов по повышению адгезии, полученные с ее помощью, сравниваются с результатами, полученными с использованием некоторых традиционных методов повышения адгезии.

Адгезия, полимеры, модификация поверхности, ультрадисперсные материалы, разряд

Углеводородные пластмассы и композиты с их применением сегодня относятся к наиболее перспективным и современным материалам: из них изготавливаются многие детали и компоненты продуктов в различных отраслях промышленности. Например, в автомобилестроении доля пластмасс составляет около 20 % от общего количества используемых материалов¹, а с учетом перспективы применения композитов на основе углеводородов в качестве деталей кузова автомобиля эта доля еще увеличится.

Подобная тенденция стала общей для промышленного производства: все больше традиционных материалов (металлы, бетон, дерево) заменяются пластмассами и композитами и поэтому должны соответствовать жестким функциональным требованиям по механическим и тепловым свойствам, внешнему виду, устойчивости к воздействию атмосферных факторов, чистящих веществ и т. п. Соответствия некоторым из таких требований, в частности по барьерным и декоративным функциям, зачастую проще всего добиться с помощью нанесения на поверхность изделия из полимерного материала различного рода покрытий.

Однако большинство полимерных материалов, используемых в качестве конструкционных (например, полиэтилен – PE, полипропилен – PP, акрилонитрилбутадиенстирол – ABS), имеет низкую адгезию к наносимым покрытиям [1], и для качественного нанесения необ-

¹ Morrison S. Thinking outside the mould: coatings for plastics. 2007. <http://www.specialchem4coatings.com/resources/articles/article.aspx?id=8215>.

ходима модификация их поверхности. Существует ряд способов такой модификации, начиная с простейшей механической подготовки (матования) и очистки поверхности от различного рода загрязнений (ультразвуковая мойка, обработка слабыми кислотами или щелочами) и заканчивая сложнейшими плазмохимическими процессами. В данной работе под адгезией мы понимаем удельную энергию, необходимую для отделения пленки, которую образует покрытие на поверхности полимера, от самой этой поверхности.

Практически все существующие в настоящее время способы модификации поверхности полимеров (химические¹ и плазмохимические [1]) предусматривают разрушение полимерных молекул и образование на поверхности материала функциональных групп различной химической природы, которые и обеспечивают высокие адгезионные свойства модифицированных поверхностей.

Современные плазмохимические методы значительно выигрывают по сравнению с химической модификацией, при которой используются такие агрессивные реагенты, как кислоты, гидроксиды, щелочноземельные металлы и их соединения (т. е., химические методы в большинстве своем предполагают использование «грязных» технологий). Плазмохимическая подготовка поверхности также оказывается наиболее технологичной операцией, которую удобно встраивать в существующие производственные линии.

Воздействие плазмы на поверхность полимера происходит только в тонком приповерхностном слое обрабатываемого изделия, толщина которого по разным оценкам составляет от 10 нм до 10 мкм [1], [3]. Основной же объем полимера не изменяется, сохраняя физико-химические свойства.

Однако эти методы имеют ряд недостатков. В первую очередь это относительно невысокий уровень повышения адгезии, сложность обработки криволинейных поверхностей, ограниченный промежуток времени, который должен пройти между модификацией поверхности и нанесением покрытия [4]. Дело в том, что количество образующихся функциональных групп, способствующих повышению адгезии, относительно невелико, поскольку мала интенсивность воздействия, особенно при заявляемых производителями оборудования скоростях обработки порядка 30–50 м. п./мин, к тому же они со временем распадаются, в результате чего возобновляются старые связи (происходит «срастание» частей полимерных молекул). Эти недостатки существенно замедляют внедрение плазмохимических методов в широкое промышленное производство².

Одним из возможных путей преодоления этих недостатков является связывание гидрофильных групп, образовавшихся на поверхности полимера, с атомами или ультрадисперсными частицами металлов. Примером подобного процесса является вакуумная металлизация. Однако получение достаточной адгезии на границе «полимер – металлическая пленка» и в этом случае возможно только путем применения импульсных режимов работы распылительных устройств и требует использования сложнейшего высоковакуумного оборудования [2]. В результате, несмотря на возможность существенного увеличения адгезии по сравнению с плазмохимическими методами, данная технология может быть востребована только при обработке деталей ограниченного характерного размера (до нескольких десятков сантиметров) и оказывается малоприменимой при крупносерийном производстве по экономическим соображениям.

¹ Там же.

² Там же.

Подобное положение требует проведения дополнительных исследований, целью которых бы являлась *разработка новой технологии и создание нового класса оборудования для модификации поверхности полимеров с использованием преимуществ и плазмохимических методов, и методов, в которых предусматривается обработка поверхности ультрадисперсными частицами металлов.*

Работы в этом направлении существенно осложняются тем, что оказывается весьма затруднительно сравнивать результаты, полученные разными авторами, так как нет общепринятого способа измерения адгезии полимеров. Известно два основных подхода к ее измерению: косвенный – путем оценки краевого угла смачивания жидкостью поверхности субстрата и прямой – оценка работы отрыва адгезива от субстрата [1], [2]. На этих подходах основано некоторое количество методик оценки адгезии: прямое измерение угла смачивания с помощью гониометра, оценка адгезии при помощи тестовых чернил, различные вариации метода решетчатых надрезов и метод отрыва.

Отсутствие общепринятого подхода к оценке адгезии потребовало от нас проведения сравнительного экспериментального исследования покрытий, получаемых с использованием наиболее распространенных плазмохимических методов обработки поверхности. Одинаковые условия проведения эксперимента и обработки результатов позволяют проводить сравнение различных методов обработки поверхности. В наших экспериментах для качественного сравнения результатов обработки поверхности полимеров использовалась одна из модификаций метода решетчатых надрезов.

Исследование нового способа модификации поверхности полимеров. В основе разработанного нами способа модификации поверхности лежат эффекты, которые сопровождают ускоренное движение плазменного сгустка между протяженными электродами в собственном магнитном поле. В результате перемещения плазменного сгустка происходят следующие процессы.

1. Перенос капель металла с поверхности электродов на обрабатываемую поверхность. Размеры капель (от 30 до 500 нм), а также результаты воздействия на обрабатываемую поверхность, изменяются в зависимости от условий проведения процесса. При относительно большом расстоянии до обрабатываемой поверхности полимера (более 4 см при атмосферном давлении) средний диаметр капель уменьшается и они прикрепляются к поверхности, увеличивая ее поверхностную энергию с 15...50 дин/см (полимеры) до 600 дин/см и более (металлы); при малом расстоянии капли внедряются под поверхность, увеличивая тем самым ее кривизну и эффективную площадь, а следовательно, и адгезию.

2. Импульсное плазменное воздействие на обрабатываемую поверхность (в котором «работают» все активные компоненты плазмы импульсного газового разряда), а также механическое воздействие ударной волны.

Исследование осаждения продуктов испарения электродов на поверхность полимеров осложняется тем, что на нее действуют сразу все перечисленные выше факторы, и определить вклад каждого из них оказывается весьма затруднительно. Для того чтобы подтвердить наличие разных действующих факторов (в первую очередь, переноса капель и конденсации вещества электродов) нам пришлось провести серию экспериментов по осаждению продуктов испарения электродов на металлические и стеклянные подложки. Использование таких подложек позволило зафиксировать наличие на их поверхности ультрадисперсного и конденсированного вещества; в случае полимерных подложек часть ка-

пель проникала под поверхность, и оценить их размер оказывалось затруднительно. Пример результата, свидетельствующего о наличии капельной фазы и о размерах отдельных капель, приведен на рис. 1, *а* (образец находился на расстоянии 25 мм от электродов). На этом рисунке представлено изображение поверхности стекла, полученное при помощи атомно-силовой микроскопии, с осажденными частицами железа, размеры которых составляют 200...800 нм в диаметре и 10...30 нм в высоту. На рис. 1, *б* приведено одно из горизонтальных сечений изображения, по которому можно составить более полное представление о высотах частиц. Горизонтальной линией отмечен приблизительный уровень поверхности стекла. В продуктах испарения электродов присутствуют и более мелкие частицы (диаметром менее 100 нм). Изменяя расстояние от поверхности электродов до подложки, можно регулировать соотношение количества крупных и мелких частиц на поверхности. При этом как крупные, так и мелкие частицы практически равномерно покрывают всю обрабатываемую поверхность.

Подобные же результаты наблюдаются и в случае обработки полимеров. Более крупные частицы (100...500 нм) механически деформируют поверхностный слой полимера, создавая неровности размером порядка нескольких микрометров, увеличивая тем самым в несколько раз возможную площадь контакта полимера с покрытием. Более мелкие (менее 45 нм) – занимают свободные связи на обрабатываемой поверхности, которые образовались в результате плазменного воздействия [5], и в дальнейшем адгезия этого участка поверхности уже определяется связями «металл–покрытие». К тому же, осаждение на предварительно активированную поверхность полимера слоя металлических частиц позволяет частично его «заморозить», т. е. избежать «срастания» старых связей, которое наблюдается после применения традиционных методов плазмохимического воздействия.

Регулируя содержание в продуктах испарения электродов относительно крупных и мелких частиц (расстоянием до обрабатываемого объекта, напряжением на электродах, суммарной емкостью конденсаторной батареи), можно создать эффект развития площади поверхности полимера. Об этом, в частности, свидетельствуют результаты атомно-силовой микроскопии обработанного по нашей технологии полиэтилена, которые приведены на рис. 2. На рис. 2, *а* показана поверхность полиэтилена после обработки предлагаемым способом, а на рис. 2, *б* – необработанная поверхность полиэтилена. На обработанной поверхности хорошо видны борозды, созданные тяжелыми частицами, внедрившимися под поверхность материала (основная часть испаренных частиц движется под углом к обрабатываемой поверхности).

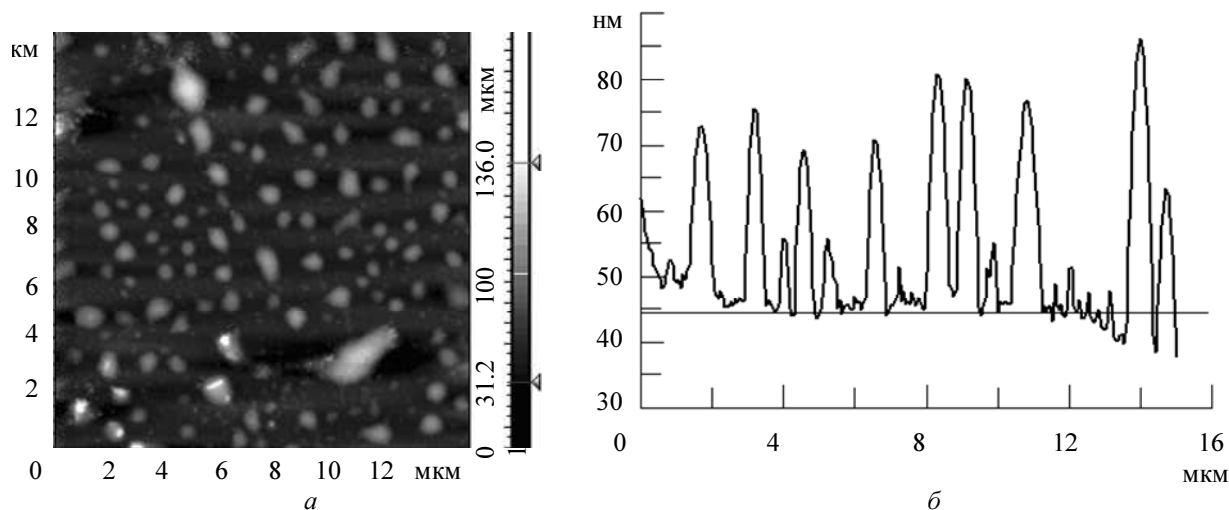


Рис. 1

Таким образом, разработанная технология позволяет объединить механический (существенное увеличение поверхности контакта полимера с ЛКП) и физико-химический (разрыв и активация связей на поверхности полимера, образование связей между поверхностью полимера и частицами металла) подходы к увеличению адгезии.

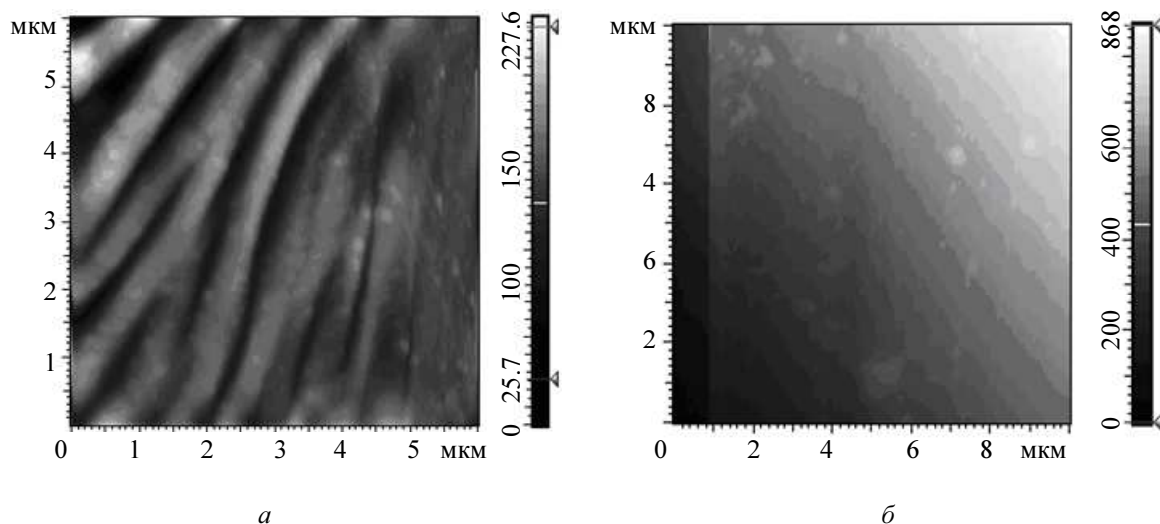


Рис. 2

Описание экспериментов. В проведенных исследованиях сравнивались результаты повышения адгезии покрытий на полимерах при использовании трех видов предварительной обработки поверхности. Первый вид обработки предполагал увеличение площади контакта «полимер–покрытие» за счет развития поверхности полимера (матование наждачной бумагой). Второй вид обработки предполагал использование плазмохимической модификации в плазме поверхностного искрового разряда. Третий – модификацию поверхности с использованием разработанного нами метода обработки плазменным стустком, движущимся между протяженными электродами в собственном магнитном поле.

Во всех экспериментах использовались подложки размером 85×35 мм из полиэтилена низкого давления (PE-LD) марки ПНД-273-83 и полипропилена (PP) марки ПП 8300. Предварительная подготовка подложек включала в себя очистку ветошью, смоченной в спирте, выделение на подложке области обработки (30×30 мм для нашего метода и 20×20 мм для обработки в плазме искрового разряда). Участки подложки, не подлежащие модификации, закрывались маской.

Оценка адгезии проводилась при помощи одного из вариантов метода решетчатых надрезов. На обработанные подложки наносили покрытие (аэрозольный алкидный грунт Touch'n Tone Primer Gray Spray, США). Окрашенные подложки (рис. 3, а) выдерживали 24 ч для полной полимеризации при температуре $20...25$ °C. Затем в области обработки острым ножом нарезали сетку из квадратов 2×2 мм (рис. 3, б). Поверх сетки помещали самоклеящуюся тканево-армированную липкую ленту Duct Tape фирмы Tesa, США. После равномерного проглаживания ленту отрывали под углом 180° с одинаковым усилием и со скоростью порядка 5 см/с.

На этапах после окрашивания, после нарезания сетки и после отрыва ленты образцы сканировались планшетным сканером с разрешением 600 dpi (предварительно аккуратно убирались отлетевшие частицы краски).

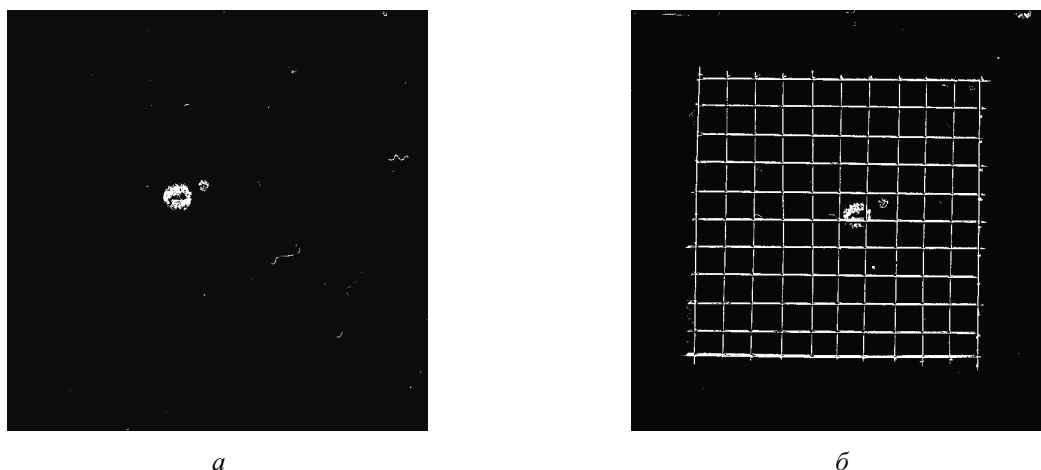


Рис. 3

Количественное выражение адгезии делалось двумя способами: подсчетом количества квадратов сетки, у которых полностью отсутствуют следы повреждений, а также при помощи оценки покрытия по четырехбалльной системе (ГОСТ 15140-78, п. 2.4).

В первом случае абсолютный показатель качества адгезии определяется как процентное отношение количества квадратов без повреждения к общему количеству нарезанных квадратов. Во втором – как сумма оценок каждого квадрата.

При проведении экспериментов по модификации поверхности в плазме искрового разряда область разряда формировалась таким образом, чтобы основная его часть проходила по поверхности полимера. Для формирования разряда использовался источник переменного напряжения частотой 100 Гц. Напряжение холостого хода источника составляло 12 кВ, а мощность – 30 Вт.

Электроды, выполненные из медного провода толщиной 0,15 мм, располагались на расстоянии 1 мм от поверхности полимера с одной его стороны и 1 см друг от друга. Процесс обработки состоял в относительном перемещении электродов и поверхности полимера с постоянной скоростью около 0,3 см/с. В экспериментах обрабатывалась площадка с размерами 20 × 20 мм.

На рис. 4 в качестве примера приведены результаты экспериментов с полипропиленовыми образцами: *а* – необработанная поверхность полипропилена; *б* – матование наждачной бумагой; *в* – плазма искрового разряда, 20 с; *г* – предлагаемый способ. Черным цветом показаны участки, на которых присутствует покрытие, белым – участки, на которых покрытия нет.

Более полный набор данных, полученных при сравнении различных методов повышения адгезии полимеров, приведен в таблице.

Анализ данных, полученных при сравнении разных методов повышения адгезии полимеров, позволяет сделать следующие выводы.

Использование предложенного метода обработки поверхности позволяет улучшить адгезию покрытия на изделиях из полиэтилена низкого давления и полипропилена в 1,5...3 раза по сравнению с обработкой в плазме искрового разряда и в 30 раз – по сравнению с обработкой матованием.

Использование искрового разряда, горящего вдоль поверхности полимера, также позволяет существенно улучшить адгезию, однако для получения адгезии, сравнимой с получаемой при обработке заявляемым способом, обработка должна проводиться со скоростью, использование которой приводит к заметному оплавлению и деформированию поверхности (неровности имеют порядок 50...100 мкм), что в большинстве приложений недопустимо.

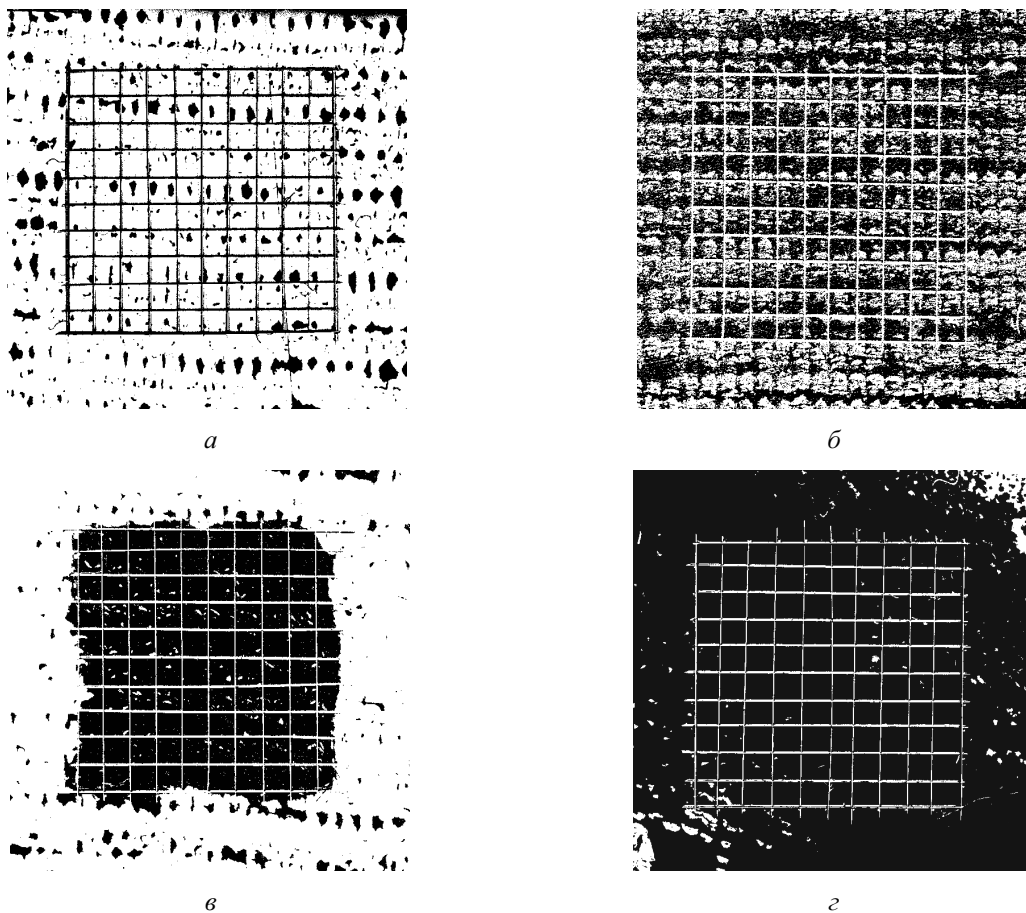


Рис. 4

Материал	Условия обработки	Условия окраски	Количественный показатель адгезии		Удельный энерговклад, Дж/см ²	Шероховатость поверхности после обработки, мкм
			1 способ, %	2 способ, баллы		
PE-LD	Без обработки	—	0	4	—	—
PP		—	0	4	—	—
PE-LD	Предлагаемый способ	Сразу после обработки	95	1	30	1...2
	Искровой разряд, 15 с		64	2	110	1...2
	Искровой разряд, 90 с	Через 2 ч после обработки	91	1	675	Более 10, наблюдается оплавление
PP	Предлагаемый способ	Сразу после обработки	94	2	30	1...2
	Искровой разряд, 20 с		63	2	150	1...2
	Матование наждачной бумагой		3	3	—	Более 10

Предложенный способ позволяет обрабатывать сложные криволинейные поверхности деталей, что практически невозможно при использовании традиционных форм обработки в плазме разряда.

Удельный энерговклад на единицу обрабатываемой поверхности (по данному параметру можно оценить энергетические показатели процесса) разрядом в 5...7 раз ниже по сравнению с качественной обработкой в искровом разряде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

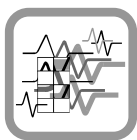
1. Берлин А. А., Басин В. Е. Основы адгезии полимеров. Сб. М.: Химия, 1969.
2. Гончаров В. Д., Фискин Е. М., Фискина М. М. Тлеющий разряд в электротехнологии. Иркутск, ИПИ, 2003. 156 с.
3. Вакула В. Л., Притыкин Л. М. Физическая химия адгезии полимеров. М.: Химия, 1984. 224 с.
4. С. А. Головятинский. Модификация поверхности полимеров импульсной плазмой атмосферного давления // Вісник Харківського університету, 2004. № 628.
5. Дерягин Б., Кротова Н. Электрическая теория адгезии (прилипания) к твердым поверхностям и ее экспериментальное обоснование // УФН. Т. 1948. XXXVI, вып. 3, нояб. С. 388–406.

V. D. Goncharov, D. S. Samsonov, I. E. Gracheva, V. A. Moshnikov, E. M. Fiskin

INCREASED ADHESION TECHNOLOGY OF POLYMER MATERIALS

New method has been designed to increase the adhesion of polymer materials. The designed method is based on a comprehensive effect exercised on polymer surface through a plasma bunch that is moving between extended electrodes within a self-magnetic field. Pilot system for surface modification has been worked out. The outcome of increased adhesion experiments produced with the system is compared with the outcome obtained due to using several traditional methods of increased adhesion.

Adhesion, polymer, surface treatment, ultrafine materials, gas discharge



УДК 534.232

Б. Г. Степанов, А. В. Теплякова

ОБ ИЗЛУЧЕНИИ ВОДОЗАПОЛНЕННОГО ПЬЕЗОЦИЛИНДРА ЧЕРЕЗ ТОРЦЕВЫЕ АПЕРТУРЫ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ ВОЛНОВОД

Рассмотрена задача об излучении внутренней боковой поверхностью водозаполненного пьезокерамического цилиндра через торцевые апертуры в полубесконечные водозаполненные цилиндрические волноводы. Анализируется влияние геометрических параметров пьезокерамического цилиндра на частотные характеристики звукового давления и сопротивления излучения.

Гидроакустический преобразователь, водозаполненный пьезокерамический цилиндр, волновод, частотные характеристики

В работах [1], [2] рассматривалась задача об излучении идеализированной модели водозаполненного цилиндрического преобразователя волноводного типа с непрерывным распределением на его внутренней цилиндрической поверхности радиальной составляющей колебательной скорости в виде бегущей волны. Реализация такого преобразователя может быть осуществлена соосным набором q цилиндрических преобразователей конечной длины l ($L = ql$), в пределах которой значение колебательной скорости постоянно:

$\dot{\xi}_r^{(2)} \Big|_{r=a} = \dot{\xi}_{im} e^{-j\omega t}$, $i = 1, 2, \dots, q$. В этой связи определенный интерес представляет анализ

работы одиночного пьезоцилиндра ($i = 1$), излучающего внутренней боковой поверхностью через торцевые апертуры в заполненные водой цилиндрические волноводы (рис. 1). При этом предполагается, подобно [1], что волноводы имеют абсолютно жесткие стенки и радиальная составляющая колебательной скорости на них $\dot{\xi}_r^{(1),(3)}(z,r) \Big|_{r=a} = 0$, например, когда

другие соосно расположенные пьезоцилиндры заторможены. В этом случае, используя рассмотренный в [1] алгоритм решения задачи, можно получить общее для всех трех областей выражение для звукового давления:

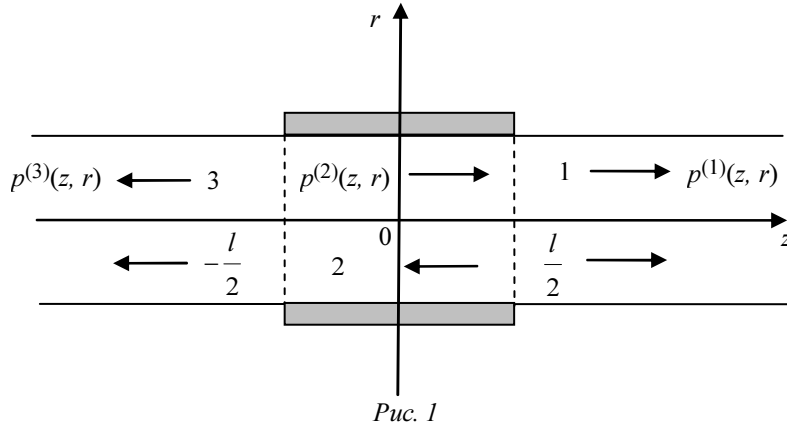


Рис. 1

$$p(z, r) = -\frac{\xi_m z_0 k_0 a}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{J_0((k_r a) r/a) \left\{ \exp \left[jk_z a \left(\frac{z}{a} + \frac{l}{2a} \right) \right] - \exp \left[jk_z a \left(\frac{z}{a} - \frac{l}{2a} \right) \right] \right\} d(k_z a)}{k_z a \cdot k_r a \cdot J_1(k_r a)}, \quad (1)$$

где $\xi_m = \xi_{1m}$; $z_0 = \rho_0 c_0$ (ρ_0 и c_0 – плотность и скорость звука в заполняющей пьезоцилиндр и волноводы жидкости); $k_0 = \omega/c_0$; k_z и k_r – проекции волнового вектора \vec{k}_0 на оси z и r ($k_0^2 = k_z^2 + k_r^2$). Подобно тому, как это осуществлялось в [1], интеграл (1) может быть вычислен для каждой из трех областей с использованием теории вычетов. При произвольном значении волнового параметра $k_0 a$ подынтегральная функция в (1) содержит конечное число простых полюсов на действительной оси ($x' = 0$; $\pm k_0 a$), симметрично расположенных относительно начала координат комплексной плоскости $k_z a = x = x' + jx''$, и бесконечное число полюсов $x'' = \pm j\sqrt{\beta_n^2 - (k_0 a)^2}$, также симметрично расположенных на мнимой оси. Здесь β_n – корни функции Бесселя первого порядка $J_1(\beta_n) = 0$ с номерами $n \geq 1$. Следует отметить, что произведение $J_1(k_r a) k_r a$ не дает полюса второго порядка, так как разложение функции Бесселя для малых аргументов дает:

$$J_1(\sqrt{t})\sqrt{t} \approx \left(\frac{\sqrt{t}}{2} + \dots \right) \sqrt{t} \approx \frac{t}{2}.$$

Решение рассматриваемой задачи должно удовлетворять принципу излучения Зоммерфельда. С целью учета нужных полюсов следует допустить малое затухание в среде так, что $k_0 = k_0' + jk_0''$ ($k_0' > 0$; $k_0'' \rightarrow 0$). Можно показать, что при этом полюсы сместятся и в верхней полуплоскости расположатся в первом квадранте, а в нижней полуплоскости – в третьем квадранте. Полюс, расположенный в начале координат, не вносит вклада в значение интеграла, так как для подынтегральной функции $F(k_z a, k_0 a)$ предельный переход дает $\lim_{k_z a \rightarrow 0} F(k_z a, k_0 a) = 0$. Тогда, вычислив интегралы в (1) с использованием теории вычетов и выполнив необходимые преобразования, запишем окончательные выражения для звуковых давлений, соответственно, в трех областях волновода:

- для области 1 $\left(\frac{l}{2} \leq z < \infty \right)$:

$$p^{(1)}(z, r) = -\dot{\xi}_m z_0 \left\{ \frac{l \sin \frac{k_0 l}{2}}{a \frac{k_0 l}{2}} e^{jk_0 z} - j2k_0 a \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(\beta_n \frac{r}{a}\right) \operatorname{sh} \left[\sqrt{\beta_n^2 - (k_0 a)^2} \cdot \frac{l}{2a} \right] e^{-\sqrt{\beta_n^2 - (k_0 a)^2} \cdot \frac{z}{a}}}{J_0(\beta_n) [\beta_n^2 - (k_0 a)^2]} \right\}; \quad (2)$$

- для области возбуждения 2 $\left(-\frac{l}{2} \leq z \leq \frac{l}{2}\right)$:

$$p^{(2)}(z, r) = j\dot{\xi}_m z_0 \left\{ 2 \frac{\cos k_0 z}{k_0 a} e^{jk_0 \frac{l}{2}} - \frac{J_0(k_0 r)}{J_1(k_0 a)} - 2k_0 a \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(\beta_n \frac{r}{a}\right) \operatorname{ch} \left[\sqrt{\beta_n^2 - (k_0 a)^2} \cdot \frac{z}{a} \right] e^{-\sqrt{\beta_n^2 - (k_0 a)^2} \cdot \frac{l}{2a}}}{J_0(\beta_n) [\beta_n^2 - (k_0 a)^2]} \right\}; \quad (3)$$

- для области 3 $\left(-\infty < z \leq -\frac{l}{2}\right)$:

$$p^{(3)}(z, r) = -\dot{\xi}_m z_0 \left\{ \frac{l \sin \frac{k_0 l}{2}}{a \frac{k_0 l}{2}} e^{-jk_0 z} - j2k_0 a \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(\beta_n \frac{r}{a}\right) \operatorname{sh} \left[\sqrt{\beta_n^2 - (k_0 a)^2} \cdot \frac{l}{2a} \right] e^{\sqrt{\beta_n^2 - (k_0 a)^2} \cdot \frac{z}{a}}}{J_0(\beta_n) [\beta_n^2 - (k_0 a)^2]} \right\}. \quad (4)$$

Из приведенных формул (2)–(4) следует, что амплитуда однородной волны (первые члены формул) зависит не только от величины l/a , но и от волнового параметра $k_0 l = 2\pi \frac{l}{\lambda_0}$, причем с увеличением частоты эта амплитуда уменьшается, обращаясь первый раз в ноль при $k_0 l = 2\pi$, т. е. при $l = \lambda_0$. Отсюда следует, что длину цилиндра следует выбирать из условия $l < c_0/f_B$, где f_B – верхняя частота рабочего диапазона. Значение частоты f_B как для отдельного пьезоцилиндра, так и для всего преобразователя волноводного типа, состоящего из соосного набора таких пьезоцилиндров, можно определить из условия распространения квазиплоских волн в трубах [3]: $f_B < \frac{\beta_1 c_0}{2\pi a}$, где $\beta_1 = 3.83$ – первый ненулевой корень функции Бесселя первого порядка $J_1(\beta_1) = 0$. Это же условие можно переписать в виде $k_0 a < \beta_1$. В итоге можно получить следующее соотношение: $l < \frac{2\pi}{\beta_1} a \approx 1.64a$.

Выражение для звукового давления (3) позволяет вычислить собственное сопротивление излучения пьезоцилиндра, нагруженного торцевыми отверстиями на водозаполнен-

ные волноводы: $Z_S = -\frac{1}{\dot{\xi}_m} 2\pi a \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} p^{(2)}(z, a) dz$. Выполнив интегрирование и ряд последующих преобразований, окончательно получим:

$$Z_S = jz_0 S \left\{ -4 \frac{l}{a} \frac{e^{jk_0 \frac{l}{2}}}{(k_0 l)^2} \sin \frac{k_0 l}{2} + \frac{J_0(k_0 a)}{J_1(k_0 a)} + \frac{4k_0 a^2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sh} \left[\sqrt{\beta_n^2 - (k_0 a)^2} \cdot \frac{l}{2a} \right] e^{-\sqrt{\beta_n^2 - (k_0 a)^2} \cdot \frac{l}{2a}}}{\left[\beta_n^2 - (k_0 a)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right\},$$

где $S = 2\pi a l$. Сопротивление излучения удобно представить также в следующем виде: $Z_S = z_0 S (r_S - jx_S)$, где r_S и x_S – безразмерные активная и реактивная составляющие сопротивления излучения.

Амплитуда колебательной скорости $\dot{\xi}_m$, входящая в выражения (1)–(4), может быть найдена из уравнения, определяющего пьезоцилиндр как колебательную систему [4]: $U_m N = \dot{\xi}_m [Z_{\text{Пр}} + Z_S]$, и становится функцией, зависящей от частоты $\dot{\xi}_m = \dot{\xi}_{0m} F(k_0 a)$. Здесь $\dot{\xi}_{0m}$ – нормирующая амплитуда; U_m – амплитуда электрического напряжения; $N = \frac{2\pi d_{31} l}{S_{11}^E}$ – коэффициент электромеханической трансформации; $Z_{\text{Пр}} = r_{\text{м.п}} - j\omega m_3 + \frac{1}{j\omega C_3}$, $r_{\text{м.п}} = \frac{r_S(1-\eta)}{\eta}$, $m_3 = 2\pi a_{\text{ср}} \delta l \rho_K$ и $C_3 = \frac{a_{\text{ср}} S_{11}^E}{2\pi \delta l}$ – соответственно, механический импеданс, сопротивление механических потерь, эквивалентные масса и гибкость пьезоцилиндра; d_{31} – пьезомодуль; S_{11}^E – упругая податливость; η – акустомеханический КПД; $a_{\text{ср}} = a + \delta/2$.

Введем понятие предельной акустической добротности преобразователя $Q_0 = \frac{\omega_{0p} m_3}{z_0 S}$, где $\omega_{0p} = 1/\sqrt{m_3 C_3} = c_K / a_{\text{ср}}$ – резонансная частота пьезоцилиндра; $c_K = 1/\sqrt{\rho_K S_{11}^E}$; ρ_K – плотность материала пьезоцилиндра. Тогда выражение для механического импеданса можно записать в следующем виде: $Z_{\text{Пр}} = \frac{z_0 S}{\eta} \left[r_S(1-\eta) - j\eta Q_0 \frac{(k_0 a)^2 n_{0K}^2 - 1}{(k_0 a) n_{0K}} \right]$, где $n_{0K} = c_0 / c_K$. Искомое выражение для амплитуды колебательной скорости будет

$$\dot{\xi}_m = \frac{U_m N \eta}{z_0 S} \left[r_S - j\eta Q_0 \frac{(k_0 a)^2 n_{0K}^2 - 1}{(k_0 a) n_{0K}} - j\eta x_S \right]^{-1} = \eta \dot{\xi}_{0m} F(k_0 a). \quad (5)$$

В выражении (5) значение Q_0 задается как постоянный параметр, хотя в общем случае значение добротности будет зависеть от характера нагруженности преобразователя. Используя общие представления для нагруженного на жидкую среду преобразователя [4], запишем выражения для его механической добротности и резонансной частоты в следующем виде: $Q = \frac{\omega_p (m_э + m_S)}{r_{м.п} + \text{Re}(Z_S)}$ и $\omega_p = [(m_э + m_S)C_э]^{-1/2}$, где $m_S = \frac{\text{Im}(Z_S)}{\omega} = \frac{z_0 S x_S}{\omega}$; $\text{Re}(Z_S) = z_0 S r_S$. Используя ранее введенные обозначения, после несложных преобразований получим:

$$Q = \frac{\rho_K c_K \eta}{\rho_0 c_0 r_S} \left\{ \frac{\delta}{a} \left[\frac{\delta}{a} \left(1 + \frac{\delta}{2a} \right) + \frac{\rho_0}{\rho_K} \frac{x_S}{k_0 a} \right] \left(1 + \frac{\delta}{2a} \right)^{-1} \right\}^{1/2}. \quad (6)$$

Как следует из формулы (6), механическая добротность изменяется пропорционально значениям параметров z_K/z_0 , δ/a и η . Выполненные расчеты показывают, что для значений $l/a \leq 0.8$ зависимость механической добротности от частоты (волнового размера $k_0 a$) проявляется сравнительно слабо. Пример такого расчета приведен на рис. 2, для которого приняты следующие значения параметров: $\delta/a = 0.15$; $\eta = 0.8$; $\rho_0 = 1.0 \cdot 10^6$ Па · с/м; $\rho_K = 7.2 \cdot 10^6$ Па · с/м; $c_0 = 1.5 \cdot 10^3$ м/с; $c_K = 3 \cdot 10^3$ м/с. Номера кривых здесь, а также для других (приведенных далее) результатов расчетов соответствуют следующим значениям: 1 – $l/a = 0.2$; 2 – $l/a = 0.5$; 3 – $l/a = 0.8$; 4 – $l/a = 1.2$. В определенной мере, характер указанной зависимости Q от $k_0 a$ для рассматриваемого варианта нагруженности пьезоцилиндра, определяется частотными зависимостями активной и реактивной составляющих сопротивления излучения, которые в нормированном к величине $z_0 S$ виде приведены, соответственно, на рис. 3, а и б.

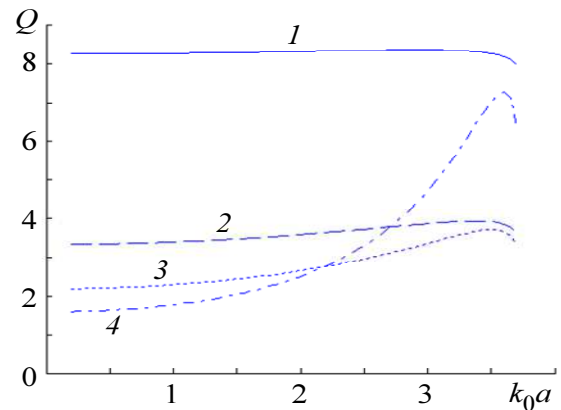
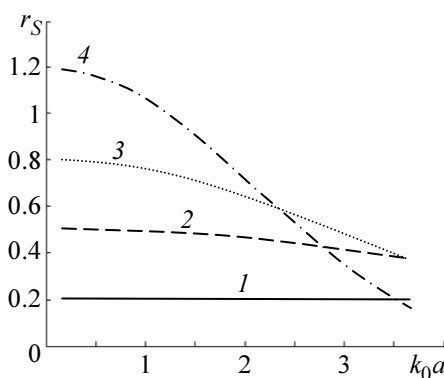
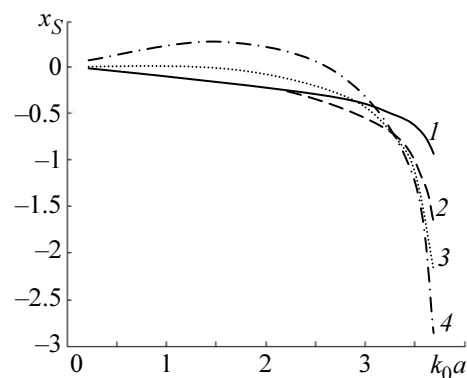


Рис. 2



а



б

Рис. 3

В силу симметрии рассматриваемой задачи, амплитудно-частотные характеристики звуковых давлений в областях 1 и 3 будут совпадать. Поэтому на рис. 4 показаны только четыре графика в зависимости от указанных ранее значений l/a для нормированных величин $|p^{(1)}| = |p^{(1)}(z, r)| / z_0 \dot{\xi}_{0m}$ и $|p^{(3)}| = |p^{(3)}(z, r)| / z_0 \dot{\xi}_{0m}$. Результаты расчета приведены для точки наблюдения на оси z , удаленной на расстояние, на порядок превышающее длину пьезоцилиндра. По мере приближения к излучающим апертурам пьезоцилиндра будет несколько увеличиваться общий уровень излучения, особенно в области частот $k_0 a > 2$, что обусловлено большим влиянием вырожденных нормальных волн высших порядков, определяемых суммами в выражениях (2)–(4). При выполнении расчетов в качестве значений Q_0 использовались данные, полученные для Q по формуле (6) на частоте $k_0 a = 2$, примерно соответствующей резонансной частоте рассматриваемой модели пьезоцилиндра. Следует отметить, что при $k_0 a < \beta_1 \approx 3.83$ зависимость амплитуды звукового давления от координаты r выражена сравнительно слабо и в основном проявляется вблизи излучающих апертур [2]. Как видно, по мере увеличения значения l/a и с возрастанием волновых размеров излучающей поверхности увеличивается не только амплитуда звукового давления, но и полоса пропускания пьезоцилиндра, достигая 50–60 %. Такой эффект, по-видимому, связан с отсутствием расхождения волнового фронта и излучением квазиплоской волны в волновод. Появление выброса в области частот $k_0 a \approx 3.8$ на амплитудно-частотной характеристике звукового давления для $l/a > 0.5$ обусловлено началом зарождения первой нормальной волны ($n = 1$). Приведенный на рис. 4 вариант расчета соответствует отношению скоростей звука $c_0/c_k = 0.5$. При значениях $c_0/c_k > 0.5$ максимумы амплитудно-частотной характеристики звукового давления смещаются в сторону более низких частот ($k_0 a < 2$), а при значениях $c_0/c_k < 0.5$ – в сторону более высоких частот ($k_0 a > 2$). Причем в последнем случае увеличивается область расхождения по частоте указанных максимумов, определяемых выбранными значениями Q_0 .

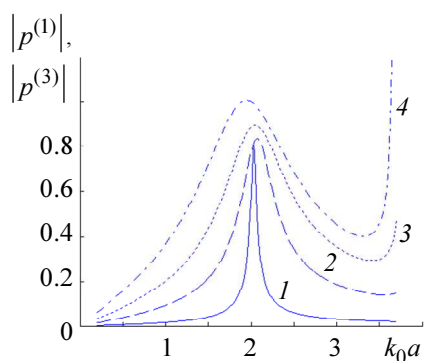


Рис. 4

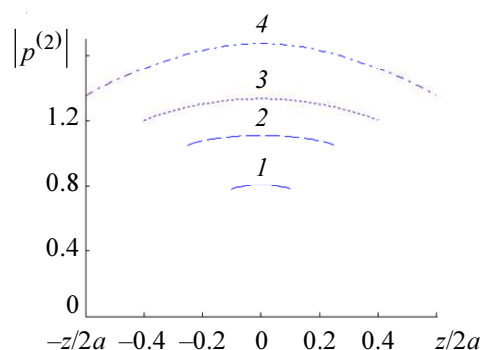


Рис. 5

На рис. 5 показан характер изменения нормированного звукового давления $|p^{(2)}| = |p^{(2)}(z, r)| / z_0 \dot{\xi}_{0m}$ в области возбуждения 2 на частоте, соответствующей $k_0 a = 2$. С увеличением относительной длины пьезоцилиндра l/a общий уровень излучения возрастает и увеличивается степень неравномерности распределения звукового давления $|p^{(2)}|$ от центра пьезоцилиндра к его излучающим апертурам.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанов Б. Г. Широкополосный преобразователь волноводного типа // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2008. Вып. 8. С. 39–50.
2. Степанов Б. Г. О возможности дополнительного расширения полосы рабочих частот широкополосных преобразователей волноводного типа // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. № 4. С. 58–64.
3. Лепендин Л. Ф. Акустика. М.: Высш. шк., 1978.
4. Свердлин Г. М. Прикладная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1990.

B. G. Stepanov, A. V. Teplyakova

ABOUT RADIATION WATER-FILLED PIEZOCERAMIC CYLINDER THROUGH ITS APERTURES IN CYLINDRICAL WAVEGUIDE

The problem about radiation by an internal flank surface water-filled piezoceramic cylinder through its apertures in semi-infinite the water-filled cylindrical waveguides is considered. Influence of geometrical parameters piezoceramic cylinder on frequency characteristics of sound pressure and resistance of radiation is analyzed.

Underwater transducer, water-filled piezoceramic cylinder, guide, frequency characteristics

УДК 531.383-11:531.714.7

И. Л. Суров, А. М. Боронахин

ИНЕРЦИАЛЬНО-СПУТНИКОВАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА НА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКАХ

Реализован алгоритм комплексирования инерциальной навигационной системы и приемной аппаратуры GPS по слабосвязанной схеме. При этом учитывался характер движения объекта-носителя (автомобильная схема). Для совместной обработки информации использовался обобщенный фильтр Калмана с обратной связью по всему вектору состояния. Представлены соответствующие экспериментальные результаты.

Инерциальная навигация, БИНС, МЭМС, GPS

С каждым годом навигация все сильнее проникает в повседневную жизнь людей. Это связано в основном с бурным развитием сетевых спутниковых радионавигационных систем (ССРНС), а также микроэлектроники. Если раньше область применения навигационных систем ограничивалась в основном судоходством, авиацией и военным применением, то уже сейчас существует такое понятие, как «персональная навигация».

ССРНС широко используются в настоящее время для решения задачи навигации как в военной, так и в гражданской сферах. Но зачастую они не могут обеспечить продолжительного и надежного навигационного решения, особенно в условиях так называемых городских «каньонов». Это связано с особенностями распространения сигналов на трассе спутник-потребитель (эффекты затенения и переотражения сигналов, преломления в атмосфере, влияния геометрии используемого созвездия на результирующую точность). Кроме того, в некоторых приложениях требуется высокая частота выработки навигационного решения (десятки герц и более).

Существует также инерциальный метод решения задачи навигации и ориентации. В основе принципа действия инерциальных навигационных систем (ИНС) лежит интегрирование ускорений, измеряемых на борту объекта акселерометрами, пространственная ориентация которых определяется гироскопическими приборами [1].

Одним из препятствий на пути широкого использования ИНС, в том числе и для целей персональной навигации, является их высокая стоимость и массогабаритные характеристики.

Между тем, в 1990-х гг. успехи в развитии микроэлектроники и микромеханики привели к созданию новых типов миниатюрных датчиков движения на основе технологий микроэлектромеханических систем (МЭМС) – микрогироскопов и микроакселерометров, которые позволили существенно расширить область применения инерциального метода навигации. Отличительными особенностями таких датчиков являются: малые габариты, масса и энергопотребление, высокая надежность и устойчивость к внешним воздействиям, низкая стоимость.

Несмотря на все свои достоинства, существующие инерциальные микромеханические датчики имеют недостаточные точностные характеристики для использования в качестве автономного решения.

Использование информации от нескольких источников (комплексирование) позволяет повысить точность, помехоустойчивость и доступность вырабатываемого совместного навигационного решения. При этом реализуется принцип избыточности, когда один и тот же навигационный параметр определяется несколькими системами, основанными на различных физических принципах.

В качестве автономных источников информации, которые используются на наземном подвижном объекте (ПО), можно привести, например:

- электронный магнитный компас (информация о магнитном курсе);
- одометрическая система (информация о пройденном пути);
- спидометр (информация об относительной скорости);
- барометрический датчик (информация об относительной высоте);
- алгоритмические методы – коррекция при нулевой скорости, ограничения на движения объекта, определение угловой ориентации по акселерометрам, привязка к карте и др.

В качестве внешних источников информации:

- ССРНС ГЛОНАСС, GPS и др. (информация о координатах и скорости);
- наземные системы сетевой мобильной связи и беспроводные компьютерные сети GSM, UMTS, WLAN и др. (информация о координатах).

При объединении нескольких навигационных измерителей наиболее широкое применение получили две схемы комплексирования, известные как способ компенсации и фильтрации [2].

Достаточно широкое распространение получило комплексирование инерциальной и спутниковой навигационных систем, при этом недостатки одной системы полностью компенсируются достоинствами другой, поэтому эффективность такого комплексирования очень высока.

Одной из развивающихся областей применения ССРНС в России и мире является автомобильная навигация и мониторинг автотранспорта (например, система ЭРА-ГЛОНАСС). Обеспечение безопасности дорожного движения является важной задачей, которая решается на уровне государства (Постановление Правительства Российской Федерации «Об оснащении транспортных, технических средств и систем аппаратурой спутниковой навигации ГЛОНАСС или ГЛОНАСС/GPS»). В 2011 г. под эгидой ООН стартовало «Десятилетие действий по обеспечению безопасности дорожного движения».

С учетом изложенного видится перспективным оснащение наземных транспортных средств не только приемной аппаратурой СНС, но и инерциальными навигационными системами на базе микромеханических датчиков (особенно для автомобилей экстренных служб).

Алгоритм бесплатформенной ИНС. Введем системы координат. В качестве базовой системы координат используется географическая система координат $O\xi\eta\zeta$. Ее начало совмещено с центром масс объекта, ось $O\xi$ направлена по касательной к параллели на восток (E), ось $O\eta$ – по касательной к меридиану на север (N), а ось $O\zeta$ – вдоль вертикали места вверх (h). С объектом жестко свяжем систему координат $OXYZ$, ось OY которой совпадает с поперечной осью объекта, ось OZ совпадает с продольной осью объекта и направлена к носу, ось OX направлена перпендикулярно плоскости пола вверх. Также введем в рассмотрение траекторную систему координат $OX_T Y_T Z_T$, у которой ось OZ_T совпадает с направлением вектора земной скорости объекта, ось OX_T направлена вдоль вертикали места вверх, а ось OY_T образует правую систему координат.

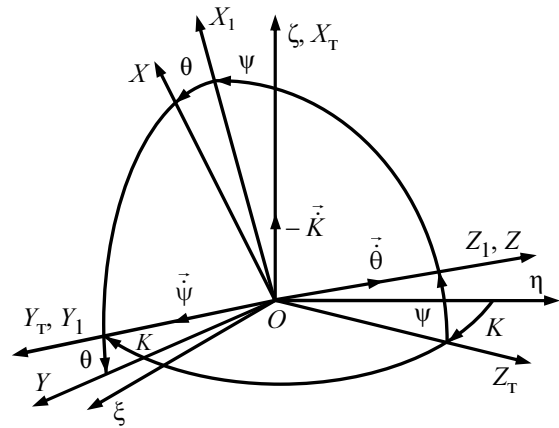


Рис. 1

Взаимная угловая ориентация трехгранников $OXYZ$, $OX_T Y_T Z_T$ и $O\xi\eta\zeta$ показана на рис. 1. Она определяется последовательными поворотами связанной с объектом системы координат относительно географической на угол курса K (по часовой стрелке вокруг оси $O\zeta$) и относительно траекторной на углы тангажа ψ и крена θ .

Переходы между системами координат осуществляются с помощью матрицы направляющих косинусов в соответствии со следующими выражениями:

а) переход из географической системы координат $O\xi\eta\zeta$ в связанную систему координат $OXYZ$:

$$[X, Y, Z]^T = A_\theta A_\psi A_K \cdot [\xi, \eta, \zeta]^T = A \cdot [\xi, \eta, \zeta]^T; \quad (1)$$

б) переход из траекторной системы координат $OX_T Y_T Z_T$ в связанную систему координат $OXYZ$:

$$[X, Y, Z]^T = A_\theta A_\psi \cdot [X_T, Y_T, Z_T]^T = B \cdot [X_T, Y_T, Z_T]^T; \quad (2)$$

в) переход из географической системы координат $O\xi\eta\zeta$ в траекторную систему координат $OX_T Y_T Z_T$:

$$[X_T, Y_T, Z_T]^T = A_K \cdot [\xi, \eta, \zeta]^T. \quad (3)$$

В выражениях (1)–(3) A_θ , A_ψ , A_K – матрицы элементарных поворотов.

На рис. 2 представлен алгоритм БИНС, учитывающий специфику движения наземного колесного подвижного объекта, а также используемых чувствительных элементов. На рис. 2 введены следующие обозначения для блоков: БА – блок акселерометров, БГ – блок гироскопов, ВУ – вычислительное устройство, B^T и A_K^T – блоки перепроектирования векторов из одной системы координат в другую.

В качестве параметров ориентации используются углы Эйлера (считаем, что для рассматриваемого типа ПО углы тангажа и крена малы). БГ измеряет проекции относительной угловой скорости $\omega_X, \omega_Y, \omega_Z$ на связанные оси, которые определяются исходя из рис. 1 следующим образом:

$$\omega_X = -\dot{K} \cos \psi \cos \theta + \dot{\psi} \sin \theta, \quad \omega_Y = \dot{K} \cos \psi \sin \theta + \dot{\psi} \cos \theta, \quad \omega_Z = -\dot{K} \sin \psi + \dot{\theta}. \quad (4)$$

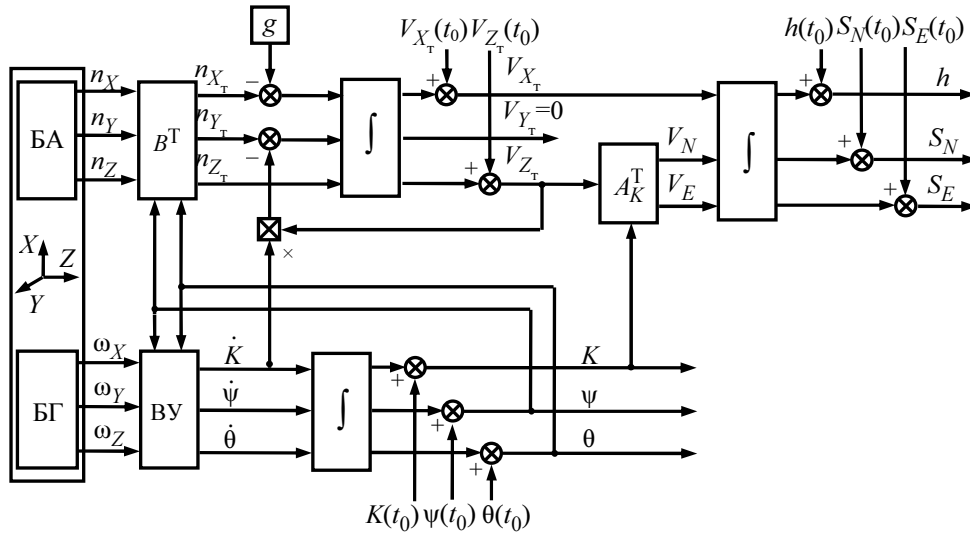


Рис. 2

В силу потенциально низкой точности микрогироскопов переносные угловые скорости за счет суточного вращения Земли, а также движения объекта по сфере не учитываются. В блоке ВУ система кинематических уравнений Эйлера (4) решается относительно угловых скоростей, интегрирование которых позволяет выработать текущие значения углов K, ψ, θ .

Для определения координат, учитывая специфику движения объекта, целесообразно использовать метод счисления пути по скорости и курсу. БА выработывает проекции вектора кажущегося ускорения n_X, n_Y, n_Z на оси связанной системы координат. В силу потенциально низкой точности микроакселерометров переносные ускорения, вызванные угловой скоростью суточного вращения Земли, движением объекта по сферической поверхности, а также ускорением Кориолиса, не учитываются. Пересчет компонент линейного ускорения из связанной системы координат в траекторную осуществляется с помощью матрицы направляющих косинусов B^T , которая формируется с помощью известных углов K, ψ, θ . Учитывая характер движения подвижного объекта, ускорения в траекторной системе координат могут быть записаны следующим образом:

$$n_{X_T} = g + \dot{V}_{X_T}, \quad n_{Y_T} = \dot{K} \cdot V_{Z_T}, \quad n_{Z_T} = \dot{V}_{Z_T}, \quad (5)$$

где \dot{V}_{X_T} и \dot{V}_{Z_T} – составляющие ускорения относительного движения объекта вдоль осей OX_T и OZ_T соответственно; g – гравитационное ускорение; $\dot{K} \cdot V_{Z_T}$ – центростремительное ускорение.

Компенсировав в уравнениях (5) составляющие, вызванные центростремительным и гравитационным ускорениями, получим ускорения относительного движения объекта. Двукратное интегрирование с привлечением информации о курсе (в виде матрицы направляющих косинусов A_K^T) позволяет определить координаты местоположения и скорости объекта.

Алгоритм комплексированной навигационной системы. Комплексирование реализуется по слабосвязанной схеме, представленной на рис. 3. Сигналы ИНС и СНС объединяются по схеме компенсации. Этот способ основан на формировании разностных измерений ИНС и СНС, согласно которому из рассмотрения исключаются сами навигационные параметры. Центральной частью комплексной системы является обобщенный фильтр Калмана (ОФК), решающий задачу оценивания по поступающим разностным измерениям [2]. Расчетная модель состояния и измерений ОФК в конечно-разностной форме имеет вид

$$\begin{cases} X_{k+1} = F_k X_k + G_k w_k; \\ Y_k = H_k X_k + Z_k, \end{cases}$$

где F_k – переходная матрица состояния; X_k – вектор состояния; G_k – матрица возмущений; w_k – дискретный белый шум; Y_k – вектор измерений; H_k – матрица измерений; Z_k – вектор ошибок измерений; k – текущая итерация.

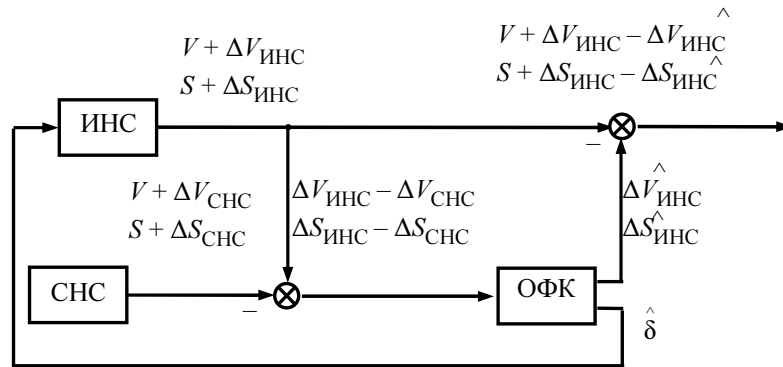


Рис. 3

В фильтре заложена модель погрешностей ИНС и СНС. Уравнения погрешностей ИНС чаще всего получают с помощью так называемых уравнений в вариациях для переменных состояния системы, представляющих собой линеаризованные относительно алгоритма идеальной работы уравнения первого приближения [3].

Модели нескомпенсированных погрешностей блока микромеханических гироскопов и микромеханических акселерометров могут быть представлены в виде

$$\Delta\omega_i = \delta\omega_i + \delta K_i^g \omega_i + \delta\omega_i^\Phi, \quad \Delta n_i = \delta n_i + \delta K_i^a n_i + \delta n_i^\Phi,$$

где $i = X, Y, Z$ – оси связанной системы координат; $\delta\omega_i$ и δn_i – квазисистематические составляющие смещения нулей, практически постоянные на достаточно длительном промежутке времени; δK_i^g и δK_i^a – погрешности масштабных коэффициентов; $\delta\omega_i^\Phi$ и δn_i^Φ – «белозумные» составляющие, характеризующие флуктуационные погрешности датчиков. Нестабильности масштабных коэффициентов и смещений нулей вносят наибольший вклад в погрешности системы.

Погрешности СНС были аппроксимированы дискретными белыми шумами на частоте 1 Гц.

Вектор состояния расчетной системы имеет вид

$$X = [\Delta K, \Delta\psi, \Delta\theta, \Delta V_{X_T}, \Delta V_{Y_T}, \Delta V_{Z_T}, \Delta S_N, \Delta S_E, \Delta h, \delta\omega_X, \delta\omega_Y, \delta\omega_Z, \delta n_X, \delta n_Y, \delta n_Z, \delta K_X^g, \delta K_Y^g, \delta K_Z^g, \delta K_X^a]^T.$$

Выработанные в ОФК оценки вектора состояния используются для замыкания отрицательных обратных связей в системе на каждом шаге ее работы.

При комплексировании БИНС и СНС по слабо- или сильносвязанным и глубокоинтегрированным схемам возможно улучшение характеристик автономных БИНС не только по координатам, но и по углам ориентации [4].

Рассматриваются следующие режимы работы системы:

- режим начальной выставки (объект неподвижен) – определение углов ψ и θ по показаниям блока акселерометров, определение начальных координат и угла K по цифровой карте, оценка систематических составляющих сдвигов нулей блока микрогироскопов (нестабильность от запуска к запуску);

- обсервационный режим – непрерывное использование данных СНС в течение длительного интервала времени, для коррекции показаний БИНС, калибровка инструментальных погрешностей инерциальных датчиков;

- автономный режим – навигационная задача решается без привлечения какой-либо внешней информации.

Привлечение информации о характере движения подвижного объекта (автомобиля) позволяет формировать дополнительные разностные измерения в обсервационном и автономном режимах работы. При этом вводятся следующие допущения: 1) объект при движении не подвержен сносу (перемещение вдоль поперечной оси равно нулю); 2) объект движется основную часть времени по горизонтальной поверхности (перемещение вдоль вертикальной оси равно нулю); 3) движение объекта имеет преимущественно прямолинейный характер, развороты совершаются в течение короткого промежутка времени и на большие углы (десятки градусов и более).

Введенные допущения позволяют, во-первых, наложить ограничения на относительные скорости объекта вдоль осей OX и OY траекторной системы координат: $V_{X_T} = 0$, $V_{Y_T} = 0$. Во-вторых, можно реализовать эвристический алгоритм коррекции курса: при условии, что приращение курса на шаге ОФК меньше порогового значения, движение на данном интервале можно считать прямолинейным (с постоянным курсом).

Векторы измерений для разных режимов работы представлены в таблице.

Режим работы	Вектор измерений
Начальная выставка	$Y = [K - K_0, V_{X_T}, V_{Y_T}, V_{Z_T}]^T$
Обсервационный режим	$Y = [V_{X_T}, V_{Y_T}, V_{Z_T} - V^{GPS}, S_N - S_N^{GPS}, S_E - S_E^{GPS}]^T$
Автономный режим	$Y = [\Delta K, V_{X_T}, V_{Y_T}]^T$, при $ \Delta K \leq 5^\circ$
	$Y = [V_{X_T}, V_{Y_T}]^T$, при $ \Delta K \geq 5^\circ$

При пересчете географических координат, полученных по показаниям GPS, в планарные используются параметры референц-эллипсоида WGS84.

Экспериментальные исследования. Для получения массива экспериментальных данных были проведены автомобильные испытания. Состав оборудования для проведения испытаний включал: блок чувствительных элементов (БЧЭ) БИНС «КомпаНав-2», приспособление для закрепления БЧЭ, приёмник GPS «Trimble Lassen IQ», портативный автономный персональный компьютер (ПК).

БЧЭ был надежно закреплен на одном из направляющих переднего сиденья легкового автомобиля (рис. 4). Антенна приемника сигналов GPS была закреплена на крыше автомобиля с помощью магнита, что обеспечивает максимальный обзор небесной полусферы. Питание системы осуществлялось от бортовой электросети автомобиля через прикуриватель.

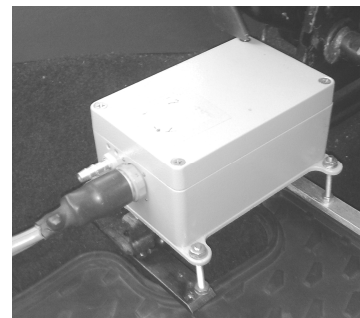


Рис. 4

Данные записывались на ПК. Испытуемая система имеет два выходных канала. По одному из них передается информация о показаниях датчиков БЧЭ с частотой 400 Гц, по второму – информация GPS с частотой 1 Гц.

Для визуального представления геопространственных данных была использована геоинформационная программа Google Earth, которая позволяет просматривать снимки земной поверхности с привязкой к географическим координатам.



Рис. 5

Навигационное решение, полученное в результате работы комплексированной системы, показано на рис. 5 светлой линией.

На рис. 6 показаны значения углов ориентации, полученных в результате работы системы. Повторяемость результатов позволяет судить об их достоверности и подтверждает тот факт, что, привлекая внешнюю информацию о скорости объекта, можно обеспечить коррекцию углов тангажа и крена. На рис. 7 представлены результаты работы ОФК в оценке параметров вектора состояния.

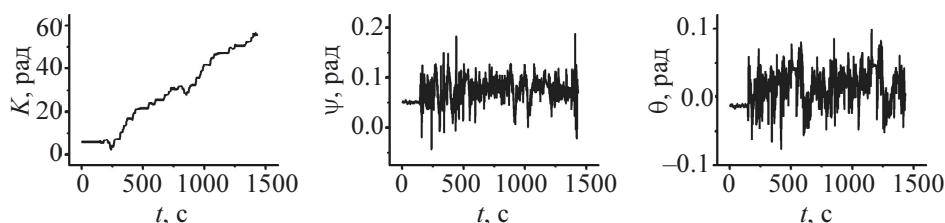


Рис. 6

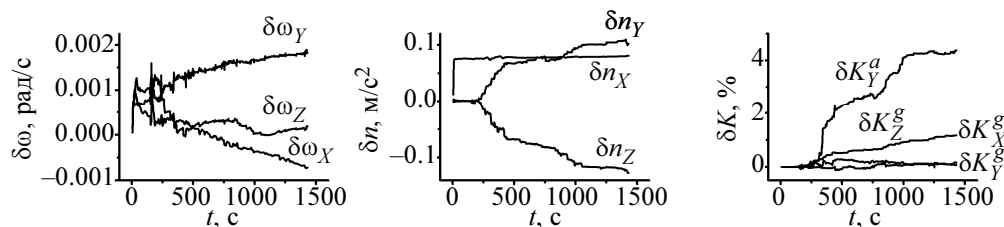


Рис. 7

Помимо работы в обсервационном режиме моделировалась ситуация отсутствия информации от GPS (в течение примерно 10.5 мин), т. е. автономный режим.

На рис. 8 показана траектория объекта, полученная на участке, где моделировалось отсутствие информации от GPS (сплошная линия), а также для сравнения траектория, полученная по информации GPS (пунктир).



Рис. 8

Анализируя рис. 8, можно отметить характерные погрешности работы системы при прохождении моста (отклонение от предположения о движении в горизонтальной плоскости) и при поворотах с большими радиусами кривизны (отклонение от предположения о прямолинейном характере движения).

Таким образом, получен навигационный алгоритм БИНС, учитывающий характер движения объекта-носителя (автомобильная схема) и специфику используемых инерциальных датчиков. С использованием обобщенного фильтра Калмана реализован алгоритм комплексирования инерциальной навигационной системы и приемной аппаратуры GPS по слабосвязанной схеме с обратной связью по всему вектору состояния. В качестве дополнительного источника информации были использованы ограничения на перемещения объекта вдоль поперечной и вертикальной осей, а также предположе-

ние о преимущественно прямолинейном характере движения объекта.

Результаты полевых испытаний с использованием блока чувствительных элементов системы «КомпаНав-2» показали: 1) в обсервационном режиме погрешность выработки координат определяется погрешностями ПА СНС; 2) в автономном режиме погрешность выработки координат определяется характером движения объекта (для рассмотренного случая накопленная погрешность составила 27 и 150 м при 5- и 10-минутном отсутствии данных от GPS соответственно).

Работа выполнялась при финансовой поддержке в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инерциальные навигационные системы морских объектов / Д. П. Лукьянов, А. В. Мочалов, А. А. Одинцов, И. Б. Вайсгант. Л.: Судостроение, 1989.
2. Матвеев В. В., Распопов В. Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / Под общ. ред. д-ра техн. наук В. Я. Распопова. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»», 2009.
3. Анучин О. Н., Емельянцева Г. И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / Под общ. ред. акад. РАН В. Г. Пешехонова. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»», 2003.
4. Ориентация и навигация морских подвижных объектов: современные информационные технологии / Б. С. Алешин, К. К. Верременко, А. И. Черноморский. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006.

I. L. Surov, A. M. Boronachin

INTEGRATED MEMS/GPS NAVIGATION SYSTEM

Loose coupling of MEMS-based IMU and GPS receiver was implemented. Specifics of land vehicle's motion were taken into account. Coupling was implemented by employing the Extended Kalman filter with state feedback. Corresponding results are represented.

Inertial navigation, strapdown INS, MEMS, GPS



УДК 519.6 : 612

А. Б. Степанов

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТОВ ПРИ ОЧИСТКЕ ОТ ШУМА И КОМПРЕССИИ СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФИИ

Рассматриваются основные подходы, применяемые к сигналам электроэнцефалографии с целью удаления из них шумовой составляющей, а также направленные на снижение размера файла записи.

Вейвлет, дискретное вейвлет-преобразование, электроэнцефалограмма, компрессия, удаление шума

Электроэнцефалография в настоящее время является одним из основных методов объективного тестирования функций центральной нервной системы – того главного, что характеризует живой мозг человека в норме и при неврологической патологии [1].

Электроэнцефалограмма (ЭЭГ) представляет собой сложный колебательный электрический процесс, который может быть зарегистрирован при расположении электродов на мозге или на поверхности скальпа, и является результатом электрической суммации и фильтрации элементарных процессов, протекающих в нейронах головного мозга [2].

Электроэнцефалографы – это сложные многоканальные устройства. Число каналов (отведений) в которых достигает 192, а время проведения исследования составляет 24 ч и более. Таким образом, объем данных исследования может быть значительным. Хранение таких файлов в памяти компьютера требует больших ресурсов, а работа с ними вводит ряд ограничений к многопоточковой обработке. В силу этого необходимо применять методы, направленные на уменьшение объема данных, хранящихся на жестком диске компьютера.

Так как все методы анализа ЭЭГ можно условно разделить на те, в которых применяются алгоритмы цифровой обработки сигналов, и методики ручного анализа, то и подход к компрессии сигналов также может быть различным. Оба направления допускают частичную потерю информации, но в первом случае потери могут быть более значительными. Это связано с тем, что как правило в таких методах анализируется только один параметр исследуемого сигнала, например частота или амплитуда. Основная задача при компрессии сводится к получению минимального объема информации, хранящейся в памяти компьютера при полном сохранении информационных признаков, необходимых для выбранного метода исследования и алгоритма цифровой обработки.

В другом случае в силу особенностей зрительного восприятия человеческого организма необходимо сохранить часть избыточной информации для возможности проведения классического анализа ЭЭГ.

Большинство алгоритмов сжатия цифровых сигналов заключается в обработке непосредственно самого файла.

Может быть предложен метод уменьшения размера файла за счет снижения частоты дискретизации. Второй метод, применяемый к электроэнцефалограмме (в силу ее многоканальности), – сокращение числа каналов. Оба эти метода могут применяться. Однако существует предел, после которого снижение числа каналов или частоты дискретизации приведет к необратимым потерям информации.

В статье предлагается метод, построенный на основе дискретного вейвлет-преобразования и позволяющий решить проблему дополнительной компрессии ЭЭГ-сигналов.

Вейвлеты (wavelets) – это обобщенное название особых функций, имеющих вид коротких волновых пакетов с нулевым интегральным значением и с той или иной, подчас очень сложной формой, локализованных по оси независимой переменной времени, способных к сдвигу по ней и масштабированию (сжатию/растяжению) [3]. Вейвлеты конструируются с помощью базисных функций – прототипов, задающих их вид и свойства. В основе вейвлет-анализа лежит возможность представления сигнала конечной энергии $f(t)$ в виде [4]:

$$f(t) = \sum_l a_l \varphi_l(t) + \sum_k d_k \psi_k(t),$$

где $\varphi_l(t)$ – масштабирующая функция, определяющая грубое приближение (аппроксимирующие коэффициенты a_l); $\psi_k(t)$ – вейвлет-функция, определяющая детали сигнала (детализирующие коэффициенты d_k).

Наиболее широкое распространение получили семейства так называемых традиционных вейвлетов, практически каждое из которых подразделяется на типы. В их названии числовое значение определяет количество коэффициентов фильтра конечной импульсной характеристикой разложения или восстановления. Известно, что количество коэффициентов задает временную длину (ширину окна) и задержку фильтра, следовательно, чем больше число коэффициентов, тем большую протяженность во временной области имеет этот вейвлет.

В статье рассматривается метод вейвлет-компрессии сигналов электроэнцефалографии, основанный на использовании одного из свойств ЭЭГ – избыточности.

Приведем случай, когда предполагается, что сигнал после компрессии будет подвергнут анализу методами цифровой обработки сигналов.

Дискретное вейвлет-преобразование может рассматриваться с точки зрения представления одномерного сигнала в виде различных уровней приближения. Сигнал может быть представлен в виде аппроксимирующей составляющей, описывающей глобальные изменения в сигнале и детализирующей, характеризующей мельчайшие детали (высоко-частотную составляющую) [5]–[7].

Используя данное свойство дискретного вейвлет-преобразования, можно производить очистку от шума и компрессию ЭЭГ-сигналов. Перед тем как говорить о шуме в ЭЭГ, необходимо пояснить, что под данным термином понимается физиологический смысл, а именно некоторая высокочастотная составляющая, имеющая физиологическую природу возникновения, но избыточная при анализе ЭЭГ. С целью уменьшения объема информации возможно удаление этой составляющей.

Существует ряд публикаций (например, [4]), в которых описываются принципы очистки одномерных сигналов от шума при помощи вейвлетов. При этом характеристики шума для таких сигналов известны.

В случае анализа ЭЭГ-сигналов нет четкого определения шума и характеристик шумовой составляющей. Тем не менее, этот вопрос является ключевым. Основным критерием при очистке сигнала ЭЭГ от шума должно служить сохранение основных составляющих графоэлементов, наличие которых позволяют точно идентифицировать физиологические особенности. Чтобы не потерять ценную информацию о сигнале необходимо руководствоваться некоторым правилом. В статье предлагается опираться на авторитетное заключение Международной электроэнцефалографической классификации, согласно которой, существует ряд основных ритмов (частотных диапазонов), которые обязательно должны присутствовать при анализе ЭЭГ. Таким образом, остальные ритмы предлагается исключить. Можно удалить часть частотных диапазонов, не участвующих в дальнейшем анализе. Наиболее важны в электроэнцефалографии частоты до 40 Гц, т. е. более высокие частоты могут быть ограничены.

В таком случае алгоритм сжатия выглядит следующим образом:

1. Вейвлет-разложение ЭЭГ-записи, представленной в цифровом виде.
2. Определение вейвлет-коэффициентов, которые несут избыточную информацию.
3. Удаление этих коэффициентов.
4. Запись остальных вейвлет-коэффициентов в память компьютера.
5. Применение классических методов сжатия полученного файла.

Рассмотрим каждый из пунктов алгоритма более подробно.

При выполнении вейвлет-разложения оригинальный сигнал может быть представлен в виде графиков аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов. Как отмечалось ранее, детализирующие коэффициенты отвечают за высокочастотную составляющую сигнала. Удалив часть детализирующих коэффициентов, можно ограничить некоторые частотные диапазоны. Правило выбора числа уровней разложения определяется исходя из центральной частоты используемого вейвлета, частоты дискретизации, верхней частоты ЭЭГ (40 Гц), способа дальнейшей обработки.

Рассмотрим пример. В качестве оригинального сигнала выберем фрагмент ЭЭГ-записи длиной 400 отсчетов (рис. 1). Используя вейвлет Добеши 'd4', выполним 3-уровневое вейвлет-разложение (рис. 2). Для данного вейвлета такое разложение позволит получить 203 детализирующих коэффициентов первого уровня (d1), 105 детализирующих коэффициентов второго уровня (d2), 56 детализирующих коэффициентов третьего уровня (d3) и 56 аппроксимирующих коэффициентов (a3). Данный вейвлет имеет центральную частоту 0.7143 Гц. Следовательно, с учетом частоты дискретизации (250 Гц), для первого уровня разложения центральная частота вейвлета составит 178.6 Гц (0.7143×250), для второго – 89.3 Гц, а для третьего – 44.65 Гц. Поэтому даже после обнуления всех детализирующих коэффициентов (d1-d3) ценная информация потеряна не будет. Ограничивая частотные диапазоны, мы также избавляемся от некоторых артефактов (например, вызванных наводкой промышленного тока частотой 50 Гц).

После такой процедуры работа фактически ведется уже только с аппроксимирующими коэффициентами (все детализирующие коэффициенты – нулевые). При необходимости дальнейшей работы с вейвлет-коэффициентами такой подход обеспечивает значительное сокращение размеров файла.

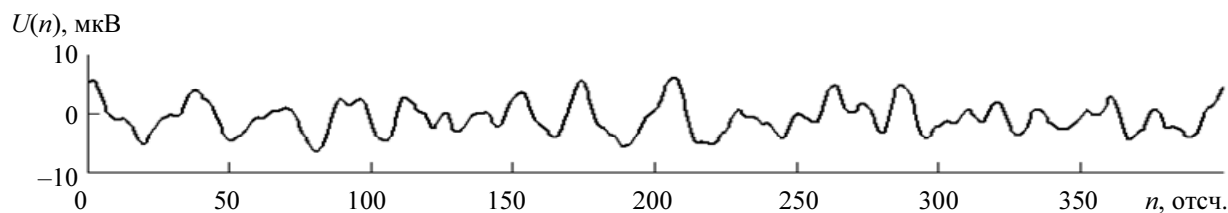


Рис. 1

Проведенные эксперименты показали, что в зависимости от используемых вейвлетов можно получить от 50 (при сохранении тонких деталей сигнала) до 92 % нулевых коэффициентов, при этом удастся сохранить до 99.4 % энергии оригинального сигнала.

В данном случае компрессия основывается фактически на вейвлет-фильтрации. Преимущество данного метода по сравнению с другими видами фильтрации заключается в возможности избирательного воздействия на ряд частотных диапазонов (не обязательно высокочастотных). Выбранный частотный диапазон может быть подвергнут дополнительным изменениям с целью акцентирования ряда особенностей, а далее учтен при восстановлении сигнала. Кроме того, как видно из рис. 2, удалив все детализирующие коэффициенты (рис. 2 б, в, г), работают уже не с 400 отсчетами оригинального сигнала, а только с 56. После чего полученные аппроксимирующие коэффициенты (рис. 2, а) сохраняются в память компьютера или могут быть подвержены дополнительной компрессии традиционными методами сжатия.

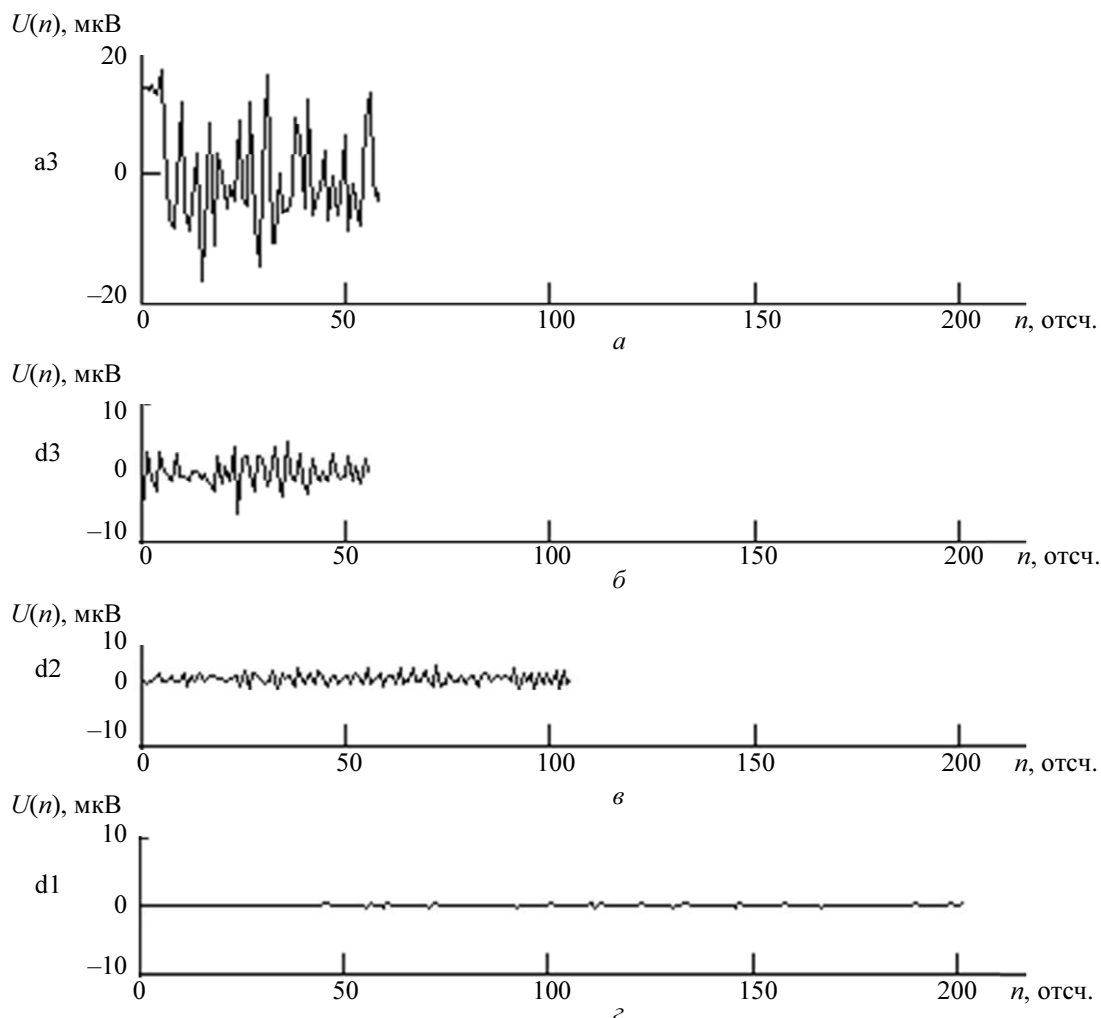


Рис. 2

Алгоритм восстановления выполняется в обратном порядке:

1. Восстановление файла записи из архива.
2. Восстановление утраченных вейвлет-коэффициентов (заполнение нулями).
3. Вейвлет-восстановление электроэнцефалограммы.

На рис. 3 представлены оригинальный сигнал (рис. 3, *a*), сигнал, полученный восстановлением на основе только аппроксимирующих коэффициентов (рис. 3, *б*), а также сигнал, представляющий собой разницу между оригинальным и восстановленным сигналами (рис. 3, *в*).

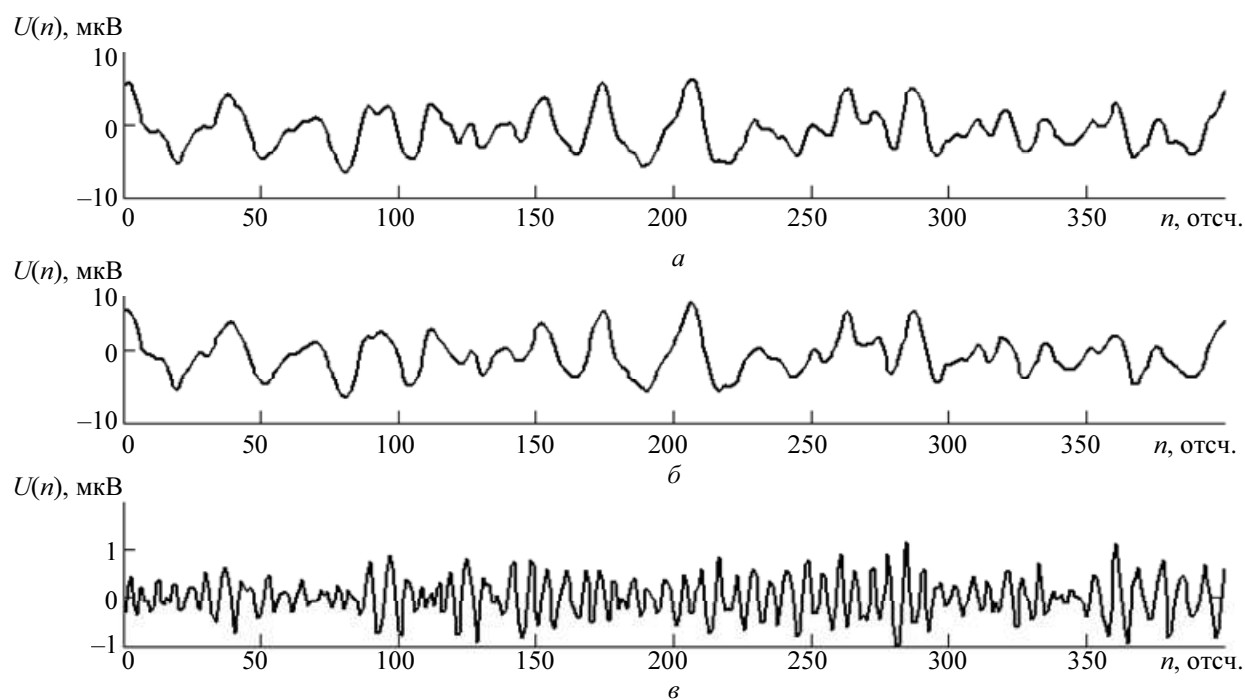


Рис. 3

Как видно из рисунка, была утрачена часть высокочастотных составляющих, но при этом основные характеристики, на основе которых может производиться дальнейший анализ методами цифровой обработки сигналов, сохранились. Однако для проведения классического анализа ЭЭГ он неудобен, так как требует отступления от традиционных методик анализа графоэлементов.

Для того чтобы решить эту проблему, необходимо сохранить часть детализирующих коэффициентов высокого порядка, т. е. те, которые несут информацию о сравнительно низкочастотных составляющих сигнала. Для описанного примера – d_2 и d_3 .

Таким образом, сигнал будет восстановлен фактически только по аппроксимирующим коэффициентам и детализирующим коэффициентам высокого порядка d_2 и d_3 (рис. 4). Следовательно, вместо 56 отсчетов необходимо хранение в памяти компьютера 217 отсчетов.

Из рис. 4 видно, что восстановленный сигнал (рис. 4, *б*), более приближенный к исходному (рис. 4, *а*), чем в предыдущем примере, может быть использован при проведении классического анализа.

Однако, как было сказано ранее, для повышения качества восстановленного сигнала пришлось увеличить размер файла и необходима возможность уменьшить размер файла, сохранив при этом качество ЭЭГ записи.

В статье предлагается принципиально новый подход к решению этой проблемы.

Алгоритм действий заключается в следующем:

1. Вейвлет-разложение ЭЭГ-записи, представленной в цифровом виде.
2. Определение вейвлет-коэффициентов, которые несут избыточную информацию.
3. Определение детализирующих коэффициентов, которые необходимо сохранить (детализирующих коэффициентов высокого уровня, например $d2-d3$).
4. Удаление остальных детализирующих коэффициентов (например, $d1$).
5. Вейвлет-разложение детализирующих коэффициентов высокого уровня (например, $d2$) на аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты ($d2a3, d2d1-d2d3$).
6. Удаление аппроксимирующих коэффициентов ($d2a3$) и детализирующих коэффициентов высокого уровня ($d2d2-d2d3$).
7. Запись аппроксимирующих коэффициентов оригинального сигнала ($a3$) и оставшихся вейвлет-коэффициентов от разложения детализирующих коэффициентов ($d2d1$) в память компьютера.
8. Применение классических методов сжатия полученного файла.

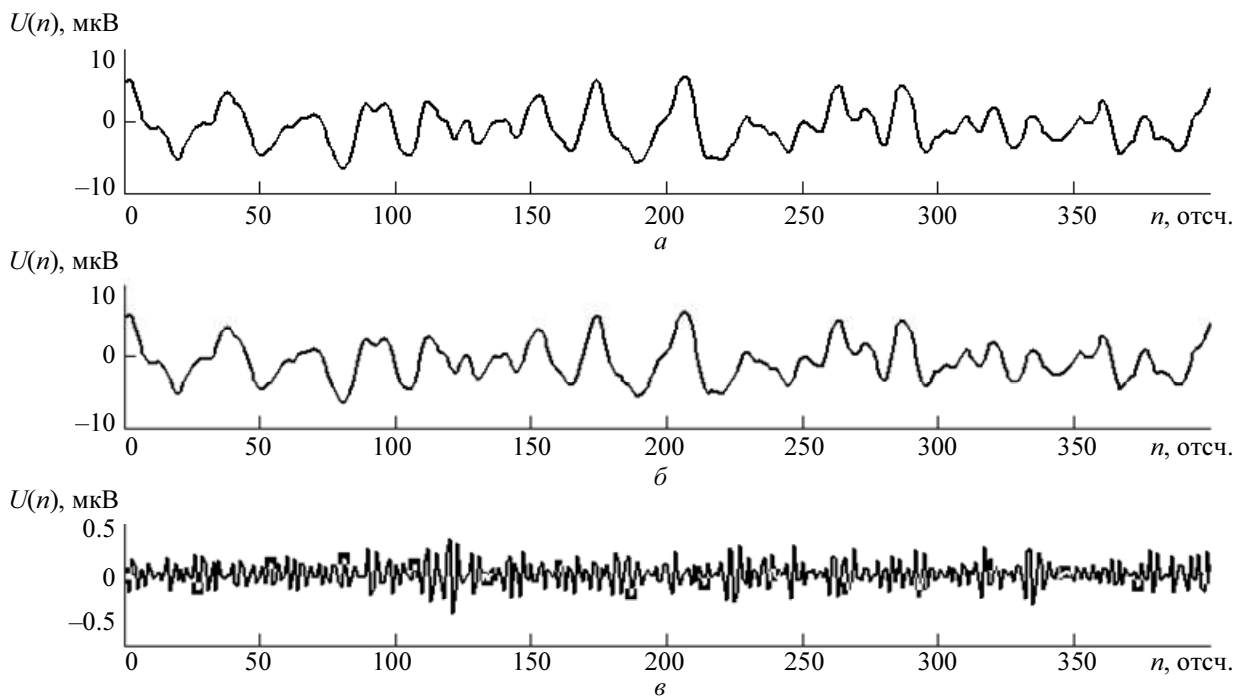


Рис. 4

Таким образом, после 3-уровневого вейвлет-разложения оригинального сигнала детализирующие коэффициенты $d1$ обнуляются, а детализирующие вейвлет-коэффициенты высокого уровня $d2$ подвергаются вновь 3-уровневному вейвлет-разложению. Полученные детализирующие коэффициенты первого уровня ($d2d1$) сохраняются, а остальные детализирующие ($d2d2-d2d3$) и аппроксимирующие коэффициенты ($d2a3$) удаляются. Для приведенного ранее примера вейвлет-разложение проводится для 105 детализирующих коэффициентов $d2$. После вейвлет-разложения получаем 56 детализирующих коэффициентов первого уровня $d2d1$ (которые сохраняются в память компьютера) и 69 аппроксимирующих $d2a3$ и детализирующих ($d2d2$ и $d2d3$) коэффициентов (которые удаляются). Таким образом, в памяти компьютера хранятся только 168 отсчетов.

Восстановление производится в обратном порядке: вначале восстанавливаются детализирующие коэффициенты $d2$, а затем и сам сигнал.

Результаты восстановления приведены на рис. 5.

Как видно из рисунка, восстановленный сигнал (рис. 5, б) отражает все, даже самые тонкие особенности сигнала и, следовательно, может применяться при классическом анализе.

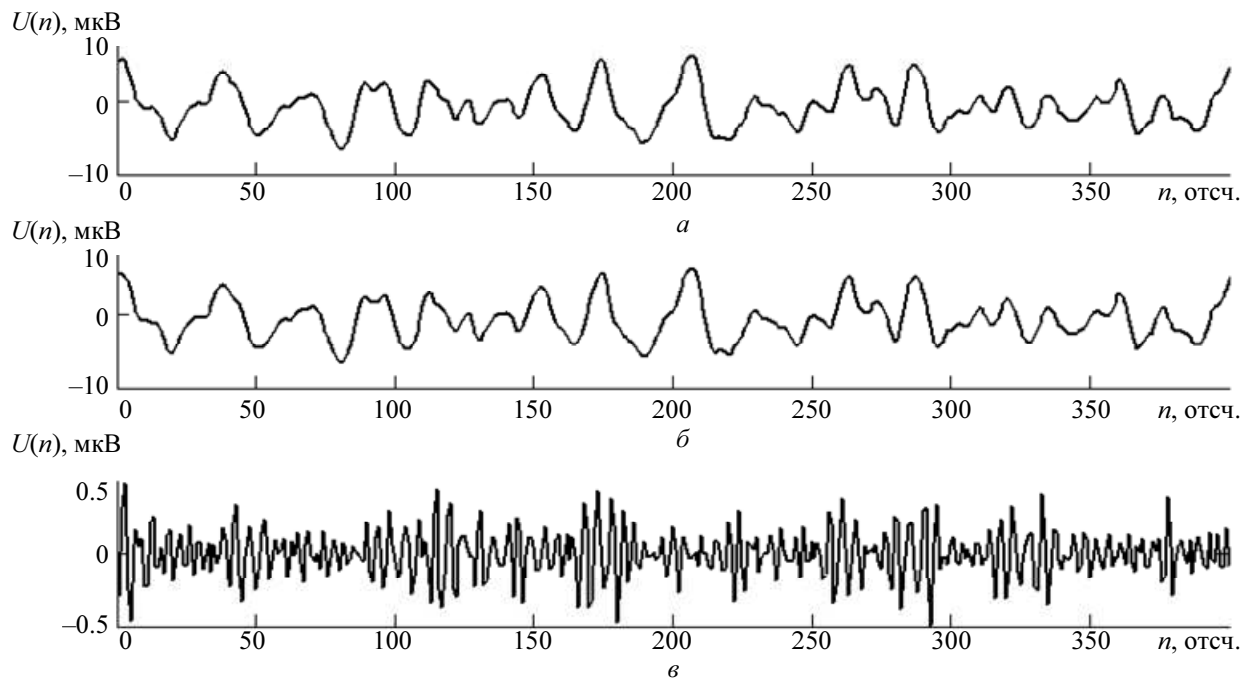


Рис. 5

Оценим полученные результаты. С этой целью вычислим максимальное и среднее квадратическое отклонение восстановленного сигнала от оригинального для каждого рассмотренного случая.

Согласно результатам исследований, приведенным в таблице, можно сделать вывод о том, что метод компрессии с разложением части детализирующих коэффициентов позволяет получить восстановленный сигнал, максимальное и среднее квадратическое отклонения которого от оригинального сигнала значительно меньше, чем при простом обнулении детализирующих коэффициентов высокого порядка. Все это говорит о том, что для компрессии сигналов электроэнцефалографии, которые в дальнейшем будут подвергнуты анализу методами цифровой обработки сигналов, может применяться подход с обнулением всех детализирующих коэффициентов и с последующим восстановлением сигнала только по аппроксимирующим коэффициентам.

Восстановление сигнала	Максимальное отклонение восстановленного сигнала от оригинального, мкВ	Среднее квадратическое отклонение восстановленного сигнала от оригинального, мкВ
С учетом всех вейвлет-коэффициентов	$2.3253 \cdot 10^{-11}$	$8.1642 \cdot 10^{-12}$
С удалением детализирующих коэффициентов d1 и d2	1.1561	0.4040
С удалением детализирующих коэффициентов d1	0.2738	0.0836
С удалением детализирующих коэффициентов d1 и разложением детализирующих коэффициентов d2	0.4927	0.1623

При необходимости сохранения большего числа деталей для возможности проведения ручного анализа требуется применять подход, при котором часть детализирующих коэффициентов также подвергается вейвлет-разложению с последующим сохранением только части детализирующих коэффициентов первого порядка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гнездицкий В. В. Обратная задача ЭЭГ и клиническая электроэнцефалография. М.: МЕДпресс-информ, 2004.
2. Зенков Л. Р. Клиническая электроэнцефалография (с элементами эпилептологии). Руководство для врачей. 3-е изд. М.: МЕДпресс-информ, 2004.
3. Солонина А. И., Арбузов С. М. Основы цифровой обработки сигналов. Моделирование в MATLAB. СПб.: БВХ-Петербург, 2008.
4. Блаттер К. Вейвлет-анализ. Основы теории. М.: Техносфера, 2006.
5. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов: пер. с англ. М.: Мир, 2005.
6. Штарк Г.-Г. Применение вейвлетов в ЦОС. М.: Техносфера, 2007.
7. Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. М.: ДМК Пресс, 2008.

A. B. Stepanov

THE USE OF WAVELETS FOR NOISE ELIMINATION AND ELECTROENCEPHALOGRAPHY SIGNAL COMPRESSION

The article sees into methods of wavelet analysis applied to EEG signals in order to eliminate the noise component in them, as well as to reduce the file size of the EEG recording.

Wavelet, discrete wavelet transform, electroencephalogram, compression, noise elimination

УДК 535.37/535.31

Е. А. Кочелаяев, А. О. Волчек, В. М. Сидоренко

МЕТОД РАСЧЕТА ИНДИКАТРИСЫ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ЧАСТИЦ АЭРОЗОЛЯ

*Предложен метод расчета в геометрическом приближении пространственного распределения излучения флуоресценции отдельных частиц биоаэрозоля произвольной формы, однородных и изотропных по оптическим свойствам. Выполнены расчеты для частиц сферической и эллиптической формы, оптические характеристики которых соответствуют экспериментальным данным для бактерий *Erwinia herbicola* и спор *Bacillus subtilis*.*

Биоаэрозоль, индикатриса флуоресценции, сферическая частица

В настоящее время в экологическом мониторинге востребована задача исследования респираторной фракции (частицы размером 1...10 мкм) патогенных биологических аэрозолей, способных вызывать аллергические реакции и болезни. При ее решении важно определить характерные признаки (маркеры), позволяющие отнести аэрозоль к тому или иному типу. Выбор тех или иных маркеров определяет информативность метода исследования.

Одним из наиболее эффективных способов выделения потенциально опасных биологических частей (патогенные бактерии и др.) на фоне частиц небиологических является проточно-оптический метод (ПОМ) [1], позволяющий проводить экспресс-анализ аэрозольного потока со скоростями до 10^4 отдельных аэрозольных частиц в секунду. В общем случае ПОМ предполагает:

1) воздействие на частицу в области анализа (область пересечения потока частиц аэрозоля и луча источника излучения) возбуждающим излучением и регистрацию ее отклика – флуоресценции и упругого рассеяния света;

2) частицы облучаются преимущественно по одной, что позволяет разделять сигналы от аэрозолей разных веществ в анализируемой пробе.

В задаче мониторинга биоаэрозолей выбор диапазонов возбуждения флуоресценции определяется содержанием флуорофоров типичных для биологических веществ и, как правило, соответствует ультрафиолетовому (УФ) излучению 260...360 нм. Регистрируемый спектр флуоресценции находится в диапазоне 300...600 нм [1].

В работах [2]–[4] показано, что для оптически прозрачных частиц аэрозоля в диапазоне размеров 1...10 мкм, пространственное распределение интенсивности флуоресценции определяется преломлением излучения на поверхности частицы. С другой стороны, в [5] продемонстрировано влияние поглощения на индикатрису флуоресценции оптически плотных частиц суспензий с малым относительным показателем преломления.

Для реальных биоаэрозолей, исследуемых ПОМ, оптическая плотность D_λ изменяется в широком диапазоне значений [6], [7], а относительный показатель преломления частицы во внешней среде (воздух) находится в диапазоне 1.3...1.5. Таким образом, следует ожидать, что индикатриса флуоресценции аэрозольной частицы должна одновременно зависеть как от поглощения излучения веществом частицы, так и от преломления излучения на ее поверхности.

В общем случае расчет индикатрисы флуоресценции позволяет решить две важные задачи:

– исследовать возможность использовать измерение индикатрисы флуоресценции в качестве нового маркера аэрозольных частиц, позволяющего расширить границы ПОМ как метода анализа;

– учесть для реальных оптических систем, используемых в ПОМ и отличающихся углами регистрации излучения частицы, влияние углового распределения флуоресценции на измеряемые сигналы.

В настоящей работе предложен метод расчета в геометрическом приближении углового распределения излучения флуоресценции отдельных частиц биоаэрозоля произвольной формы, однородных и изотропных по оптическим свойствам. С использованием данного метода выполнены расчеты для частиц сферической и эллиптической формы, оптические характеристики которых соответствуют экспериментальным данным, для бактерий *Erwinia herbicola* и спор *Bacillus subtilis* [6], [7].

Описание расчетной модели. Для расчета характеристик флуоресценции аэрозольной частицы введем малый флуоресцирующий кубический объем ΔV , для сторон которого выполнено условие:

$$\Delta X = \Delta Y = \Delta Z \ll d. \quad (1)$$

где d – диаметр сферической частицы. Объем ΔV является достаточно малым, чтобы считать плотность потока световой энергии I , падающую на грань $\Delta X \Delta Y$ постоянной, но достаточно большим, чтобы среда внутри ΔV являлась оптически однородной, изотропной и содержала большое количество флуоресцирующих молекул.

Для каждого ΔV угловое распределение излучения флуоресценции принимается изотропным, аналогично [2]. Так как выполнено условие (1), излучение элементарного объема эквивалентно излучению точечного источника, помещенного в центр ΔV . Тогда энергия флуоресцентного излучения ϵ элементарного объема ΔV в области анализа:

$$\varepsilon = W_{\text{ф}} \Delta V = \frac{Ik}{c} \Delta V, \quad (2)$$

где $W_{\text{ф}}$ – средняя объемная плотность энергии флуоресцентного излучения в объеме ΔV , Дж/м³; I – средняя плотность потока возбуждающего излучения, попавшего на грань элементарного объема, Вт/м²; k – коэффициент, учитывающий эффективность возбуждения флуоресценции ($k = K \Delta Z \chi$, K – коэффициент поглощения на длине волны возбуждения, χ – квантовый выход флуоресценции); c – скорость света. Если внутри частицы $k = \text{const}$, а ΔV по всему объему частицы постоянен, то ε определяется только падающей на грань элементарного объема плотностью потока I .

При анализе механизмов влияния поглощения и преломления на индикатрису флуоресценции объем частицы аппроксимировался набором слоев цилиндрической формы одинаковой высоты h , соосных направлению возбуждающего излучения Z . В таком случае энергия флуоресценции $E_{\text{н}}$, излученная в выбранном направлении регистрации определяется суммой вкладов отдельных флуоресцирующих слоев $E_{\text{н.сл}/i}$:

$$E_{\text{н}} = \sum_{i=1}^s E_{\text{н.сл}/i} = \Delta V \frac{k}{c} \sum_{i=1}^s \left(\eta_i \sum_{j=1}^{U_i} I_{i,j} \right), \quad (3)$$

где s – число цилиндрических слоев; $E_{\text{н.сл}/i}$ – энергия флуоресценции, излученная в выбранном направлении регистрации от каждого i -го слоя; η_i – доля флуоресцентного излучения, пришедшая от i -го слоя в выбранном направлении регистрации (определяется формой частицы, комплексным показателем преломления n' и учитывает также и поглощение флуоресценции веществом частицы); U_i – число элементарных объемов в каждом i -м цилиндрическом слое; $I_{i,j}$ – плотность потока возбуждающего излучения на j -м элементарном объеме внутри i -го цилиндрического слоя. При достаточном количестве слоев плотность потока возбуждения $I_{i,j}$ внутри отдельного слоя слабо изменяется ($\Delta I_{i,j} < 10\%$) в направлении нормали к основанию слоя (направление параллельно оси частицы Z). В этом случае энергия флуоресценции, излученная слоем в выбранном направлении регистрации, определяется распределением $I_{i,j}$ в одном сечении слоя высотой ΔZ :

$$E_{\text{н}} = \Delta V \frac{k}{c} \sum_{i=1}^s \eta_i \sum_{j=1}^{p_i m} I_{i,j} = \Delta V \frac{km}{c} \sum_{i=1}^s \eta_i \sum_{j=1}^{p_i} I_{i,j}, \quad (4)$$

где p_i – число элементарных объемов в каждом сечении i -го цилиндрического слоя высотой ΔZ ; m – число элементарных объемов, которые укладываются по оси каждого i -го цилиндрического слоя высотой h ($h = m \Delta Z$, $U_i = p_i m$). Заметим, что формула (4) справедлива для частицы произвольной формы, так как при выполнении условия $\Delta I_{i,j} < 10\%$ изменяется только профиль сечения.

Расчет энергии флуоресценции $E_{\text{н}}$, определяемой соотношением (4), был реализован в 2 этапа в программе Zemax-EE. Данная программа позволяет в геометрическом приближении вычислять распространение светового излучения через однородные оптические среды с учетом поглощения света средами и преломления излучения на границе сред, различающихся по n' .

На первом этапе расчета E_H для каждого i -го флуоресцирующего слоя было вычислено распределение плотностей потока $I_{i,j}$ внутри частицы с учетом преломления возбуждающего излучения на поверхности частицы. Предполагается освещение частицы параллельным пучком, что соответствует лазерным источникам излучения, которые применяются в большинстве современных систем ПОМ [1]. Так как применяемая версия Zemax-EE не позволяет учесть поглощение среды, в которой установлен приемник, то $I_{i,j}$ определялось без учета ослабления возбуждающего излучения веществом частицы, и энергия флуоресценции каждого излучающего слоя дополнительно нормировалась на τ_i – относительное пропускание возбуждающего излучения вдоль оси Z суммы $i - 1$ слоев, предшествующих i -му слою частицы:

$$E_H = \Delta V \frac{km}{c} \sum_{i=1}^s \tau_i \eta_i \sum_{j=1}^{P_i} I_{i,j}. \quad (5)$$

На втором этапе в Zemax-EE рассчитывалось флуоресцентное излучение, дошедшее до приемников, расположенных вне частицы, от каждого i -го излучающего слоя. Моделью излучающего слоя служил набор изотропно излучающих точечных источников, расположенных в одной плоскости, с мощностью каждого источника пропорциональной $I_{i,j}$. Отметим, что при этом учитывалось поглощение флуоресцентного излучения на оптических путях лучей внутри частицы.

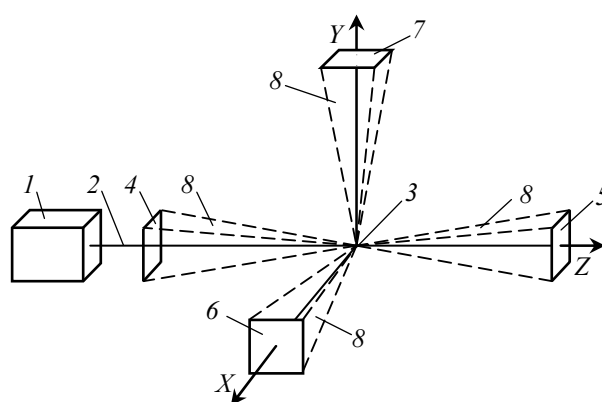


Рис. 1

Положение приемников относительно излучающей частицы показано на рис. 1, где 1 – источник излучения; 2 – луч источника (совпадает с осью Z); 3 – частица; 4–7 – приемники излучения флуоресценции; 8 – излучение флуоресценции (ограничено пунктиром), дошедшее до приемника. Приемниками 4–7 регистрировалась энергия флуоресценции, излученная слоем частицы в направлениях «обратное» (180° относительно оси возбуждения – направление, противоположное оси возбуждения Z , приемник 4), «прямое» (0° относительно оси Z , приемник 5), «боковое» (90° относительно оси Z – ось X , приемник 6) и «верхнее» (90° относительно оси Z – ось направления потока частиц Y , приемник 7). Числовая апертура NA приемников составляла 0.18, при этом частица относительно приемников являлась точечным источником (размеры частицы минимум на 2 порядка меньше характерных размеров приемников и расстояний от частицы до приемников).

Указанный метод вычисления был предварительно протестирован с целью оценки погрешности получаемых данных. Расчетная погрешность зависела от количества моделируемых лучей возбуждения и флуоресцентного излучения и не превышала 5 %.

Результаты расчетов и обсуждение. Расчет углового распределения флуоресценции был выполнен для сферических частиц, оптическая плотность которых изменялась в широком диапазоне значений: оптически прозрачные частицы ($D_\lambda = 0$), частицы с незначительным поглощением ($D_{в, \phi} \leq 0.2 \dots 0.5$, где подстрочный индекс «в» соответствует

длине волны возбуждения, а «ф» – флуоресценции), частицы оптически плотные для возбуждающего излучения ($D_B > 0.5$, $D_\Phi \leq 0.2 \dots 0.5$), оптически плотные частицы с $D_{B, \Phi} > 0.5$. Кроме этого была рассмотрена слабопоглощающая частица эллиптической формы с соотношением осей 1:5 ($D_{B, \Phi} \leq 0.2 \dots 0.5$). Согласно [6] к частицам с незначительным поглощением ($D_{B, \Phi} \leq 0.2 \dots 0.5$) можно отнести бактерии размером 1...10 мкм при возбуждении $\lambda = 360$ нм и регистрации флуоресценции с пиком на 430 нм: $n'_{\lambda=360} = 1.545 - i0.00035$ ($D_{\lambda=360} = 0.013 \dots 0.13$), $n'_{\lambda=430} = 1.533 - i0.000279$ ($D_{\lambda=430} = 0.008 \dots 0.08$). Те же бактерии должны рассматриваться оптически плотными для возбуждающего излучения $\lambda = 265$ нм ($n'_{\lambda=265} = 1.59 - i0.00035$, $D_{\lambda=265} = 0.2 \dots 1.8$) и прозрачными для пика флуоресценции $\lambda = 360$ нм ($D_{\lambda=360} = 0.013 \dots 0.13$). Споры [7] 1...10 мкм являются оптически плотными частицами при возбуждении на 265 нм и пике флуоресценции на 365 нм: $n'_{\lambda=265} = 1.55 - i0.014$ ($D_{\lambda=265} = 0.65 \dots 6.54$) и $n'_{\lambda=365} = 1.53 - i0.016$ ($D_{\lambda=365} = 0.56 \dots 5.69$). Отметим, что указанные оптические свойства частиц слабо изменяются в широких диапазонах длин волн флуоресценции.

Для анализа влияния эффектов преломления и поглощения на угловое распределение флуоресценции удобно рассмотреть следующие отношения сигналов на приемниках 4–7 (рис. 3):

$$\alpha = \frac{\text{обратное}}{\text{прямое}}; \quad \beta = \frac{\text{обратное}}{\text{боковое}}; \quad \gamma = \frac{\text{обратное}}{\text{верхнее}}. \quad (6)$$

Для сферических частиц сигналы в боковом и верхнем направлениях равны и разница в расчетах не превышает отмеченной погрешности 5 %, поэтому для данных частиц результаты расчетов флуоресценции в верхнем направлении не приводятся.

При $D_\lambda = 0$ расчет показал появление максимума индикатрисы флуоресценции в обратном направлении:

$$\alpha = 3.3; \quad \beta = 3.8; \quad \gamma = 3.9. \quad (7)$$

Данные результаты наглядно интерпретируются слоевой моделью, описанной выше. Из-за преломления поверхностью частицы лучей флуоресценции индикатриса флуоресценции отдельных излучающих слоев перестает быть изотропной. Максимальное и минимальное значения энергии флуоресценции находятся на оси возбуждения Z , при этом максимум излучения находится в направлении более удаленной от слоя поверхности, а минимум – в направлении ближней к слою поверхности. Степень асимметрии индикатрисы отдельного слоя (степень отклонения от изотропности) растет при удалении слоя от центра частицы и оказывается максимальной для краевых ($I = 1, 2, 9, 10$) слоев, тогда как для центральных слоев ($I = 5, 6$) индикатриса почти изотропна.

Индикатриса флуоресценции всей частицы (общая индикатриса) определяется суммой вкладов отдельных слоев и при однородном возбуждении вещества сферической частицы является изотропной в силу симметрии задачи. Так как фокусировка возбуждающего излучения внутри сферы приводит к более эффективному возбуждению удаленных ($I > 5$) от лазера слоев, то происходит доминирование вкладов в общую индикатрису слоев с $I > 5$, имеющих максимум пространственного распределения флуоресценции в направлении источника излучения (отрицательное направление оси возбуждения Z). В результате данного геометрического эф-

факта общая индикатриса флуоресценции модельной прозрачной сферической частицы имеет максимальное значение в направлении «обратное». Полученный результат не зависит от диаметра сферических частиц и согласуется с данными работ [2]–[4].

Для реальных частиц оптическая плотность D_λ отлична от нуля и наряду с геометрическим эффектом присутствует эффект поглощения возбуждающего излучения и излучения флуоресценции. Поглощение возбуждающего излучения приводит к уменьшению вклада в общую индикатрису более удаленных от источника слоев и, следовательно, к снижению их вклада в общую индикатрису частицы.

Поглощение флуоресценции приводит к изменению индикатрисы отдельных слоев в сравнении с прозрачной частицей. Так как излучение отдельных слоев поглощается в большей степени в направлении более удаленной поверхности частицы, то для индикатрисы флуоресценции отдельных слоев с ростом оптической плотности наблюдается тенденция, обратная геометрическому эффекту, – увеличение относительной доли энергии в направлении ближней к слою поверхности сферы по оси Z .

В общем случае степень влияния отдельных эффектов на индикатрису флуоресценции зависит от величин оптических плотностей частицы на длинах волн возбуждения D_B и флуоресценции D_Φ . Для слабопоглощающих частиц $D_B, \Phi \leq 0.2 \dots 0.5$ влияние эффектов поглощения слабо заметно и индикатриса определяется главным образом геометрическим эффектом. Так, расчет частицы 10 мкм ($D_{\lambda=360} = 0.13$, $D_{\lambda=430} = 0.08$) показывает, что α , β , γ мало отличаются от аналогичных параметров для прозрачной частицы (7):

$$\alpha = 3,0; \beta = 3,4; \gamma = 3,5. \quad (8)$$

Для слабопоглощающих частиц меньшей оптической плотности ($D_B, \Phi < 0.13$) влияние поглощения оказывается менее заметным и значения α , β , γ находятся в диапазонах: $\alpha = 2.8 \dots 3.5$; $\beta = 3.2 \dots 4.0$ (границы диапазона указаны с учетом погрешности численного моделирования 5 %). На рис. 2 показаны зависимости α и β для частиц различной оптической плотности, кривые 1 и 2 соответствуют α и β при $D_B, \Phi < 0.13$.

Если частица является оптически плотной для возбуждающего излучения ($D_B > 0.2$) и при этом прозрачной или слабопоглощающей для излучения флуоресценции ($D_\Phi < 0.2$), ее общая индикатриса определяется совместным действием геометрического эффекта и эффекта поглощения возбуждающего излучения. Для таких частиц ослабление влияния геометрического эффекта при $D_B > 0.2$ приводит к возрастанию вклада в общую индикатрису излучения ближних к источнику слоев, флуоресценция которых максимальна в направлении «прямое». В результате α и β уменьшается с ростом D_B и при $D_B > 3.7$ индикатриса частицы имеет максимум в направлении «прямое» (рис. 2: α – кривая 3, β – кривая 4).

Индикатрису флуоресценции оптически плотных частиц ($D_B, \Phi > 0.5$) определяет совместное действие всех названных эффектов. Как видно из рис. 2, α (кривая 5) имеет минимум в области $D_B = 2 \dots 3$. Для частиц с $D_B < 3$ преобладает эффект уменьшения α при увеличении D_B за счет ослабления возбуждения последних слоев, аналогично эффекту, описанному ранее для частиц, слабо поглощающих флуоресценцию.

Для частиц с $D_B > 3$ общая индикатриса определяется главным образом вкладом первых слоев и ее максимум из-за существенного поглощения флуоресценции смещается в направлении источника. В результате энергия флуоресценции всей частицы в обратном направлении стремится к некоторому пределу (излучают только ближние к источнику слои), тогда как флуоресценция в прямом направлении для непрозрачной частицы стремится к нулю (флуоресценция ближних к источнику слоев поглощается веществом частицы, а удаленные от источника слои оказываются невозбужденными).

Поведение параметра β (кривая б) объясняется подобным образом с той лишь разницей, что флуоресценция в боковом направлении не стремится к нулю при больших значениях D_B и достигает некоторого предела, когда излучающими являются только первые поверхностные слои абсолютно непрозрачной частицы. Результаты расчетов показывают, что в большом диапазоне значений оптической плотности ($0.6 \leq D_B \leq 6.5$) β оптически плотных частиц (кривая б) не превышает β слабопоглощающих частиц (кривая 2), что позволяет ввести по измерению β критерий разделения оптически плотных и прозрачных частиц.

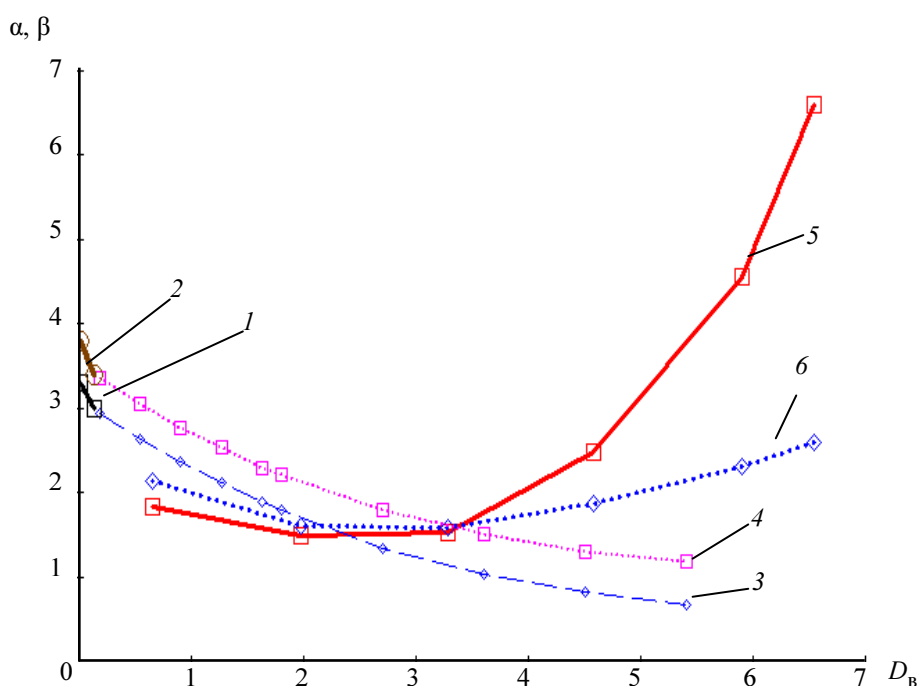


Рис. 2

Так как при $D_B < 4.5$ значения α оптически плотных частиц (кривая 5) находятся ниже, а при $D_B > 5.5$ – выше значений α слабопоглощающих частиц (кривая 1), то для $0.6 < D_B < 4.5$ и $D_B > 5.5$ параметр α также позволяет различать оптически плотные и слабопоглощающие частицы. Кроме того, по α определяются частицы, оптическая плотность которых превышает 5.5 ($\alpha > 3.9$ для всех $D_B > 5.5$). Таким образом, указанные эффекты делают возможной классификацию веществ по их оптической плотности измерением углового распределения энергии флуоресценции частицы в соответствующих направлениях регистрации.

Важным следствием отмеченных эффектов является сужение диапазона V регистрируемых сигналов для оптически плотных по возбуждению ($D_B > 0.5$) сферических частиц одной группы, т. е. однородных частиц, обладающих одинаковой формой, имеющих одина-

ковые значения оптических постоянных и одинаковую концентрацию излучающего вещества. Для слабопоглощающих частиц можно приближенно считать, что регистрируемая энергия флуоресценции E_H пропорциональна объему частицы и $V = E_{10 \text{ мкм}} / E_{1 \text{ мкм}} = 1000$. Поглощение возбуждающего излучения для частиц $D_B > 0.5$, $D_\Phi < 0.2$ приводит к тому, что зависимость регистрируемого сигнала от размера частицы перестает быть кубической и $V_{\text{обр}} = E_{10 \text{ мкм}} / E_{1 \text{ мкм}} = 324$, $V_{\text{прям}} = E_{10 \text{ мкм}} / E_{1 \text{ мкм}} = 524$, $V_{\text{бок}} = E_{10 \text{ мкм}} / E_{1 \text{ мкм}} = 426$. Для оптически плотных частиц ($D_{(B, \Phi)} > 0.5$) при регистрации в обратном направлении $V_{\text{обр}} = E_{10 \text{ мкм}} / E_{1 \text{ мкм}} = 31$, в боковом – $V_{\text{бок}} = E_{10 \text{ мкм}} / E_{1 \text{ мкм}} = 25$, в прямом направлении максимальный сигнал соответствует частице 5 мкм и $V_{\text{прям}} = E_{5 \text{ мкм}} / E_{1 \text{ мкм}} = 17$.

Для оценки влияния формы частицы на разброс регистрируемых сигналов флуоресценции было рассчитано угловое распределение флуоресценции слабопоглощающей эллиптической частицы с соотношением осей 1:5 (2:10 мкм) по описанной выше методике (оптические параметры были аналогичны слабопоглощающей сферической частице). Предполагалось, что большая ось эллипсоида совпадает с осью потока частиц. Ввиду иной формы преломляющей поверхности распределение энергии возбуждающего излучения внутри эллиптической частицы отличается от сферического, и параметр γ («обратное»/«верхнее») из-за асимметрии задачи уже не является тождественно равным β (направление «верхнее» совпадает с большой осью эллипсоида). В результате вычислений были получены следующие значения отношения сигналов α , β , γ :

$$\alpha = 1.4; \quad \beta = 1.6; \quad \gamma = 2.7.$$

Если сравнить эти данные с полученными результатами для слабопоглощающей сферической частицы, состоящей из того же вещества (см. (8)), то можно заметить, что эллиптическая форма снижает значения α , β более чем в два раза. Также следует отметить существенное отличие значений β , γ ($\gamma \approx 1.8\beta$), которое определяется различным преломлением лучей в боковом и верхнем направлениях.

Таким образом, разработанная методика расчета флуоресценции аэрозольных частиц позволила произвести анализ совместного влияния геометрических эффектов и эффектов поглощения на угловое распределение флуоресценции. Моделирование показало, что действие эффектов является совместным, а степень влияния определяется оптической плотностью аэрозольной частицы.

Важным следствием проведенных оценок является зависимость диапазона регистрируемых сигналов флуоресценции от оптической плотности исследуемых частиц, а также от формы их поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кочелаев Е. А., Волчек А. О. Оптическая система регистрации для проточно-оптического метода анализа биоаэрозолей // Оптический журнал. 2011. № 7–8 (6). С. 23–30.
2. Domann R., Hardalupas Y., Jones A. R. A study of the influence of the influence of absorption on the spatial distribution of fluorescence intensity within large droplets using Mie theory, geometrical optics and imaging experiments // Meas. Sci. Technol. 2002. № 13. P. 280–291.
3. Enhanced, Backward-directed multiphoton-excited fluorescence from dielectric microcavities / S. C. Hill, V. Bou-tou, J. Yu, et al. // The American Physical Society. 2000. № 1. P. 54–57.
4. Backward-Enhanced Fluorescence from clusters of microspheres and particles of tryptophan / Y.-L. Pan, S. C. Hill, J.-P. Wolf, et al. // Appl. Opt. 2002. V. 41, № 15. P. 2994–2999.

5. Сидоренко В. М. Молекулярная спектроскопия биологических сред. М.: Высш. шк., 2004. С. 105–115.
6. Optical properties of *Erwinia herbicola* Bacteria at 0.19–2.5 μm / E.-T. Arakawa, P. S. Tuminello, B. N. Khare, M. E. Milham // *Biopolymers*. 2003. P. 391–398.
7. Optical properties of *Bacillus subtilis* spores from 0.2 to 2.5 μm / P. S. Tuminello, E.-T. Arakawa, B.-N. Khare, et al. // *Appl. Opt.* 1997. № 13. P. 2818–2824.

E. A. Kochelaev, A. O. Volchek, V. M. Sidorenko

THE CALCULATIONS METHOD OF FLUORESCENCE INDICATRIX OF AIRBORNE PARTICLES

*The geometrical optics approximation method is proposed for calculation of angle distribution fluorescence intensity of single airborne particles with arbitrary shape, homogeneous and isotropic on optical properties. The calculation results are presented for fluorescence indicatrix of spherical and elliptical particles with optical characteristics of bacterium *Erwinia herbicola* and spores *Bacillus subtilis*.*

Airborne particles, fluorescence indicatrix, spherical particle



УДК 531/539:61

П. И. Безун, Д. А. Рубашова, О. В. Щепилина

БИОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ СТРУКТУР ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ОРГАНИЗМА

Изложены вопросы, связанные с моделированием биологических объектов при разработке информационных технологий исследования состояния структур человеческого организма. Проанализированы возможности интегрального компьютерного метода. Обосновано развитие этого метода как симбиоза биомеханического компьютерного моделирования и анализа биологических структур по данным клинических исследований.

Биомеханика, моделирование, информационные технологии, биологические объекты, содержательная модель, Mimics, Solid Works, метод конечных элементов

Вычислительный эксперимент в биомеханике как технология научных исследований дает возможность выявлять свойства организма, которые потом могут быть теоретически обоснованы и, в конечном счете, служить фундаментом для дальнейших медицинских исследований. Такая постановка задачи включает в себя построение и исследование содержательных моделей и связана с использованием многократных расчетов посредством специализированных программных средств.

По сравнению с натурными испытаниями на экспериментальных установках интерактивные исследования позволяют накапливать результаты, создавая информационную базу, которая затем быстро и гибко позволяет применять данный подход в решении вопросов, связанных с другими системами организма.

Неоспоримым преимуществом является то, что появляется возможность анализировать нелинейные явления, происходящие в структурах человеческих органов и тканей, что, в свою очередь, приводит к рождению новых идей, теорий и методов в развитии междисциплинарных связей. Результаты компьютерного моделирования решают не только качественные задачи, связанные с обнаружением новых свойств организма: устойчивости, целостности, развития динамики разрушения, – но и количественные, которые имеют прогностический характер.

Моделирование – метод исследования явлений, процессов и систем, основанный на построении и исследовании их моделей.

Содержательная модель – это умозрительное представление реального объекта, предназначенное для построения математической или физической модели, в которой отражены свойства реального объекта, необходимые для получения ответа на поставленный вопрос.

Информация – это сведения о системе, о ее структуре и функциях, выраженные моделью, поэтому особое значение в жизнедеятельности человека приобретают вопросы моделирования, базовыми элементами которого являются реально существующие и создаваемые объекты. В связи с этим возрастает роль обоснованного выбора моделей.

Современные способы получения диагностической информации позволяют зафиксировать различные элементы поведения функционирующих структур организма во времени и пространстве. Информация, получаемая такими методами визуализации, как компьютерное томографирование, кардиомагнитный резонанс, катетеризация и ангиография, в подавляющем большинстве случаев используется лишь частично, и оценка ее носит качественный характер. В то же время процессы, которые фиксируются этими методами, несут информацию, связанную с природой явлений, вызванных патологическим процессом. Возможности математического анализа физических взаимодействий, связанных с состоянием биологического объекта, и построения конкретной модели поведения лежат за пределами знания врача, но они также недоступны специалисту, владеющему только физико-математическим аппаратом без включения в этот процесс знаний того же самого врача. При разработке информационных технологий исследования состояния структур человеческого организма необходимо объединение знаний людей различных специальностей.

Во всех принципиальных направлениях проблемы: медицинских, технических и фундаментальных – неотъемлемой частью является моделирование биологических объектов на основе биомеханики. При этом построение моделей функционирования структур человеческого организма в норме, патологии и при хирургических операциях целиком и полностью зависит от использования всего арсенала новых методов и средств исследования. Последнее десятилетие характеризуется стремительным развитием биомеханики. Ведущее место занимает интегральный компьютерный метод, позволяющий анализировать состояние структур биологических объектов в норме, патологии и при коррекции. Метод представляет собой симбиоз биомеханического компьютерного моделирования и анализа биологических структур по данным клинических (томографического, ангиографического, эхографического) исследований. Сложность геометрических форм исследуемых биологических объектов, неоднородность и анизотропия их конструктивных механических свойств предопределили построение математических моделей в рамках механики трехмерного тела и параметрических моделей, построенных в конечно-элементных пакетах CosmosWorks, NASTRAN, COMSOL, ANSYS, интегрированных в CAD-систему Solid Works.

Процесс моделирования любого объекта начинается с геометрических построений, трудоемкость которых может быть соизмерима с затратами на весь проект. При этом до недавнего времени, как правило, разрабатывались и анализировались идеализированные модели, которые могли существенно отличаться от, например, тазобедренного сустава пациента. Ситуация изменилась кардинальным образом после внедрения в клиническую практику результатов компьютерной томографии конкретного пациента. Интерактивный программный пакет Mimics позволяет визуализировать, сегментировать и повышает точность построения трехмерных объектов изображения, полученных с помощью томогра-

фии (рис. 1), например, построение содержательной модели методом линейного измерения в Solid Works 2010 (рис. 1, а) и построение содержательной модели методом импорта из Mimics в Solid Works 2010 (рис. 1, б).

В модели вводятся механические характеристики материала структур биологических объектов, исследованные in vitro со статистической коррекцией на возраст и степень развития патологии. В [1]–[8] рассмотрены биомеханические модели структур человеческого организма, излагаются основные подходы и допущения при построении содержательных и математических моделей. Последовательно прослеживается переход от биологического объекта к содержательной модели, от содержательной модели к математической, от математической модели к компьютерной реализации. В [2], [4], [6] приведены сведения о механических свойствах биологических тканей и отдельных органов.

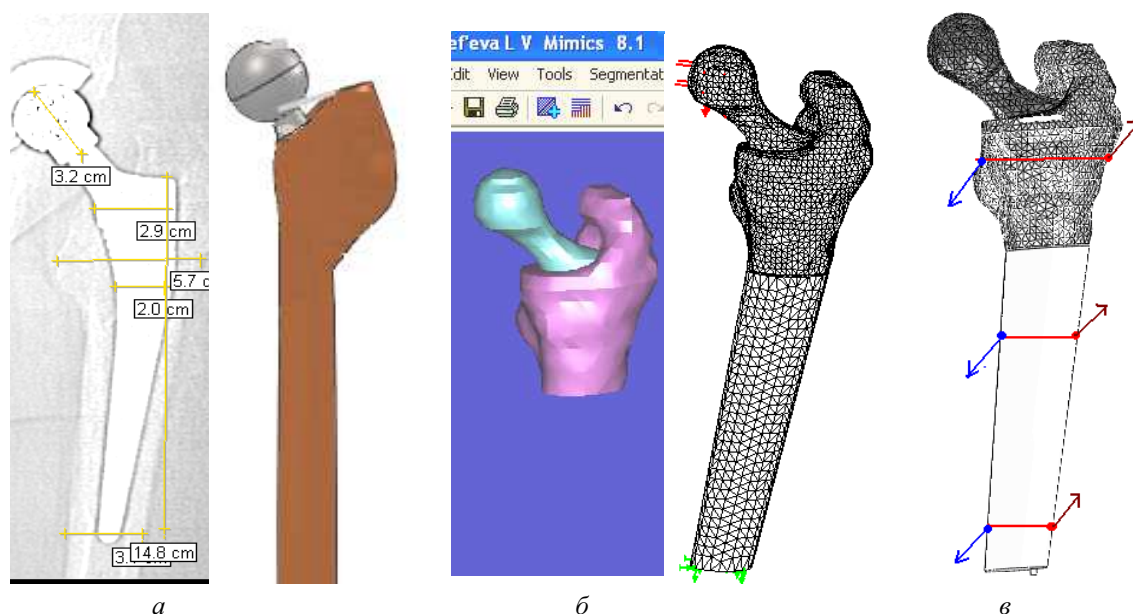


Рис. 1

Процесс моделирования состоит в выделении свойств объекта и его взаимодействия с другими объектами, отражении особенности функционирования при различных внешних воздействиях и логическом анализе собранной информации.

Каждое исследование в области технических наук включает следующие этапы: 1) постановку задачи; 2) построение содержательной модели и выяснение при помощи теории ее закономерностей; 3) практические выводы по результатам проведенных исследований.

Математическая модель – это система математических соотношений: формул, уравнений, неравенств и т. д., отражающих существенные свойства объекта или явления. Это абстракция, в которой функционирование реальных объектов и взаимоотношения между ними заменены отношениями математических категорий.

Прежде чем свести задачу к математической модели, необходимо провести большую работу и серьезно подумать над тем, как правильно воспринимать реальную конструкцию, особенности ее функционирования и как обоснованно построить содержательную модель.

Пример 1. Большинство моделей тазобедренного сустава строятся без учета взаимодействия с окружающими тканями [4], [5], что снижает адекватность модели при прогнозировании результатов протезирования. Необходимо в модели выделять ведущие группы

из мышц-сгибателей, мышц-разгибателей, отводящих и приводящих мышц, которые оказывают дестабилизирующее действие на систему кость – эндопротез (схема распределения мышечной нагрузки в верхней, средней и нижней трети тазобедренного сустава приведена на рис. 1, в). Учет мышечных усилий позволяет создать информационную модель, которая будет востребована в доклинических исследованиях для анализа механических разрушений в чувствительных зонах реконструированного тазобедренного сустава.

Модель отражает структуру и функцию системы-оригинала средствами структуры или функции тех элементов, из которых она строится. Всякое познание можно трактовать как моделирование, а имеющиеся знания – как модели, отражающие какой-то объект.

Например, при малоинвазивных интервенционных рентгенохирургических операциях с установкой протезов – стентов – при дилатации стенозированных кровеносных сосудов для определения величины и характера воздействия на патологическую структуру при обеспечении минимально возможного повреждения кровеносного сосуда необходимо располагать информацией о патофизиологических, морфологических, геометрических и механических характеристиках сосуда и о процессах реконструкции органа как следствия различных режимов воздействия на биологическую структуру при определенном физиологическом состоянии организма пациента в целом. На различных стадиях развития патологического образования каждая из перечисленных характеристик принимает существенно различные значения.

Построение моделей функционирования структур человеческого организма в норме, патологии и при хирургических операциях целиком и полностью зависит от использования всего арсенала новых методов и средств исследования.

Новые возможности пакета прикладных программ Solid Works позволяют оценивать взаимодействие сопрягаемых между собой поверхностей и изменение свойств объекта при динамических нагрузках.

Пример 2. На границе эндопротеза (титан) и кортикального слоя кости учет взаимодействия сопрягаемых между собой поверхностей и проникновения компонентов значительно изменяет величину и характер напряженно-деформированного состояния. Динамический линейный анализ, по сравнению со статическим, показал более полную картину распределения напряжений и дает возможность оценить изменение параметров во времени.

Пример 3. В настоящее время существует большой выбор технических средств для измерения внутриглазного давления. Их существенный недостаток – измеряется не истинное внутриглазное давление, а тонометрическое (инструментальное). При измерении

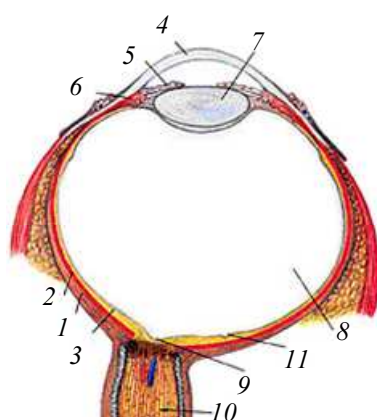


Рис. 2

внутриглазного давления у одного и того же пациента разными методами тонометрии можно получить результаты с разницей в 11,5 мм рт. ст. (20 мм рт. ст. – давление в норме), что является существенной погрешностью для диагностики таких заболеваний, как, например, глаукома. На результаты тонометрии влияют геометрические параметры и механические свойства структур глазного яблока (рис. 2: 1 – склера, 2 – сосудистая оболочка, 3 – сетчатка, 4 – роговица, 5 – радужка, 6 – ресничная мышца, 7 – хрусталик, 8 – стекловидное тело, 9 – диск зрительного нерва, 10 – зрительный нерв, 11 – желтое пятно). Содержательная модель, состоящая из двух сфе-

рических сегментов, соединенных на границе роговицы и склеры упругим кольцевым элементом [7], не позволяет учитывать влияние на измерения внутриглазного давления геометрических параметров и механических свойств лимба и диска зрительного нерва. Построенные в [8] содержательные модели (рис. 3, а, б: P_K , $P_{ВЧ}$, $P_{ВГ}$ – соответственно компрессионное, внутричерепное и внутриглазное давления), реализованные в программном пакете SolidWorks, позволяют учесть влияние геометрических параметров и механических свойств лимба и диска зрительного нерва.

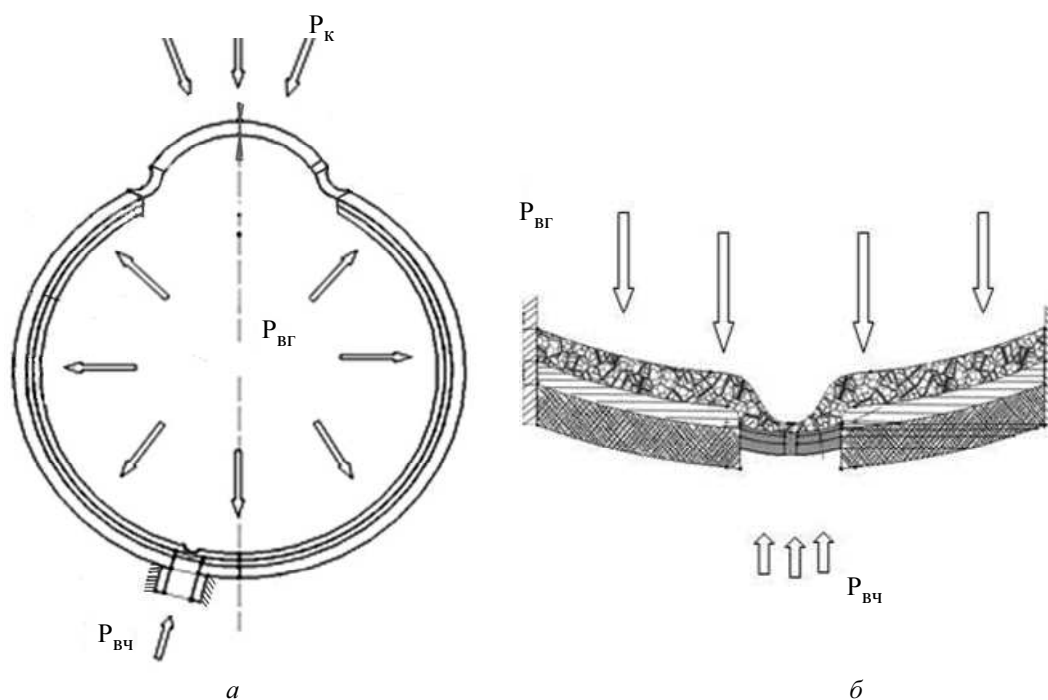


Рис. 3

Необходимо путем минимального отступления от действительной конструкции максимально приблизить содержательную модель к разработанному эффективному методу и (или) находящимся в распоряжении пакетам прикладных программ. При этом в процессе моделирования постепенно углубляется понимание поставленной задачи. Недопустимо, минуя анатомические, морфологические, физиологические сведения о конкретном биологическом объекте, начинать построение математической модели с расчетных схем, формально перенесенных из разделов теоретической механики и сопротивления материалов.

При сравнении моделей необходимо оценивать следующие свойства: 1) адекватность; 2) простоту и оптимальность; 3) гибкость; 4) универсальность и проблемную ориентацию; 5) эффективность машинной реализации. Модель должна обладать свойством адекватности по отношению к исследуемым свойствам объекта. Для сложных объектов можно построить модель, отражающую лишь какую-либо его сторону. В этом случае адекватность – отражение только какой-то стороны объекта. Оценка адекватности модели – уровень достижения цели моделирования. Точность модели зависит от возможностей моделирования в конкретной области знаний, от сложности объекта и от метода моделирования. Структура и функции объекта моделируются упрощенно либо потому, что еще не известны соответствующие математические и программные средства, либо потому, что недостаточно ясна суть рассматриваемого явления. Самая точная модель – копия, но в

биомеханике это недопустимый предел. Если рассматриваемая система состоит из нескольких моделей, то результат моделирования определяется как свойствами каждой модели в отдельности, так и характеристиками их взаимодействия. При этом необходимо помнить, что наилучшее решение находится, как правило, на пределе возможностей системы и малейшее отклонение ее разрушает. Все оптимальные системы, как правило, крайне неустойчивы. Модель должна быть гибкой – параметрической. Параметрическая модель – описание объекта, которое позволяет вариациями параметров в заданных пределах получить все множество его состояний. Модели должны быть специализированы по типу объектов и универсальны по исследуемым функциям. Использование компьютерных программ, основанных на численных методах, позволяет углубиться в области, которые остаются необслуженными аналитическими методами из-за больших трудностей в реализации. Аналитический метод и метод компьютерного численного анализа – взаимопроникающие и дополняющие друг друга методы. При мощном программном обеспечении компьютерный численный анализ занимает доминирующее положение. Аналитические методы позволяют проводить оценку точности реализованной модели с использованием пакета прикладных программ на примерах задач, сходных с рассматриваемыми, но настолько простых, что возможна их аналитическая реализация.

Следующий этап моделирования заключается в переводе содержательной модели на формальный математический язык соответствующего уровня. Наиболее эффективно математическую модель можно реализовать на компьютере в виде алгоритмической модели – так называемого вычислительного эксперимента. Если в модели не будут учтены какие-то важные стороны объекта, возможно несоответствие результатов вычислительного эксперимента действительности. В этом случае следующий этап состоит во вскрытии моментов, не укладывающихся в установленную схематизацию, и в переходе к построению новых допущений, полнее охватывающих исследуемый процесс. Искусство построения математической модели состоит в том, чтобы совместить как можно большую лаконичность в ее математическом описании с достаточной точностью модельного воспроизводства именно тех сторон анализируемой реальности, которые интересуют при данном анализе.

Биомеханический анализ с использованием компьютерных программ может показать и несостоятельность новых медицинских методов.

В основу биомеханического моделирования биологических объектов должны быть положены следующие принципы:

1. Геометрические и механические характеристики моделей должны соответствовать индивидуальным характеристикам структур конкретного человеческого организма.

2. Из общего набора существующих к моменту построения модели сведений об исследуемом объекте необходимо, прежде всего, выделить наиболее существенные для исследуемого процесса. Затем сформулировать качественные особенности физиологического процесса. После этого можно переходить к его количественному описанию.

3. При исследовании напряженно-деформированного состояния биологического объекта в расчетные схемы необходимо включать окружающие биологические структуры.

4. При задании внешних воздействий надо учитывать физиологический процесс, происходящий в рассматриваемом биологическом объекте и окружающих его структурах. Должны учитываться изменения механических свойств на протяжении физиологического цикла исследуемого объекта и окружающих его структур.

5. При исследовании напряженно-деформированного состояния реконструированной биологической структуры необходимо учитывать изменение во времени как механических свойств биологического объекта и окружающих его структур, так и технических элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Математическое моделирование и биомеханика в современном университете // Труды междунар. школы-семинара, пос. Абрау-Дюрсо, 23–27 мая 2005. Ростов н/Д: НПК «Гефест», 2005. 69 с.; Тезисы докл. III Всерос. школы-семинара, пос. Дивноморское, 28 мая – 1 июня 2007. Ростов н/Д: Terra Принт, 2007. 92 с.
2. Всерос. конф. по биомеханике: тезисы докл. // Биомеханика. 2006. 22–26 мая. 292 с.; 2008. 20–24 мая. 300 с.
3. Математические модели и компьютерное моделирование в биомеханике: Учеб. пособие / Под ред. А. В. Зинковского, В. А. Пальмова: СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. 516 с.
4. Акулич А. Ю., Акулич Ю. В., Денисов А. С. Экспериментальное определение разрушающих касательных напряжений трабекулярной костной ткани головки бедра человека // Российский журнал биомеханики. 2010. Т. 15. № 4(50). С. 7–14.
5. T. Navrat, M. Vrbka. Strain-stress analysis of pathological hip joint after osteotomy // Engineering MECHANICS. 2008. Vol. 15. № 5. P. 345–354.
6. Journal of Biomechanics. 2008. Vol. 41. № 1–11. 2603 p.
7. Абушек Г. В. Напряженно-деформированное состояние составной мягкой сферической оболочки, предварительно нагруженной внутренним давлением // Вестн. С.-Петербург. ун-та. 2008. Сер. 1. Вып. 1. С. 85–92.
8. Бегун П. И., Рубашова Д. А. Биомеханическая система для анализа структур глаза // Известия ЮФУ. Технические науки. 2009. № 9. С. 21–26.

P. I. Begun, D. A. Rubashova, O. V. Schepilina

BIOMECHANICAL MODELING AND INFORMATION TECHNOLOGY RESEARCHES OF THE HUMAN BODY STRUCTURES

Article includes questions related to the modeling of biological objects on the basis of biomechanics in the development of information technology research on the state structures of the human body. The possibilities of computer-integrated method. Development of this method is justified as a symbiosis of biomechanical simulation and analysis of biological structures based on clinical research.

Biomechanics, modeling, information technology, biological objects, the content model, Mimics, Solid Works, a finite element method



УДК 001.1+1

В. В. Калинина

К ВОПРОСУ О ПОЗИТИВНЫХ И НЕГАТИВНЫХ АСПЕКТАХ ПРОЦЕССА ИНФОРМАТИЗАЦИИ СОВРЕМЕННОГО ОБЩЕСТВА

Рассматриваются сущность понятия информация и процессы информатизации современного общества. Выявляются позитивные и негативные аспекты информатизации социума. Осуществляется философский анализ информационных технологий, в рамках которого акцентируется внимание на аксиологическом измерении процесса информатизации.

Информатизация, информационное общество, информационно-коммуникативные технологии, информация, технический прогресс

Представление об информационном обществе было разработано в XX в. рядом ученых, в их числе американский социолог и философ Э. Тоффлер. Согласно его концепции человеческое общество прошло в своем развитии несколько стадий: аграрную, индустриальную, постиндустриальную – и подошло к современной стадии развития – информационной [1]. Информационное общество – общество, в котором большинство работающих занято производством, хранением, переработкой и реализацией информации, особенно высшей ее формы – знаний.

Философское осмысление современного общества позволяет говорить о нем как о постиндустриальном, находящемся на стадии перехода к информационному. В настоящее время важнейшими стратегическими ресурсами общества являются информация и знания. Деятельность отдельных людей, групп, коллективов и организаций сейчас все в большей степени начинает зависеть от их информированности и способности эффективно использовать имеющуюся информацию. Афоризмы «знание – сила», «информация правит миром», «информация – это власть» весьма актуальны. В России и в мире реализуются крупномасштабные инновационные проекты, связанные с внедрением информационных технологий во все сферы жизни общества¹. Эти технологии призваны облегчить существование современного человека как в мегаполисе, так и в сельской местности, улучшить качество его жизни.

¹ Портал информационной поддержки инновационных проектов. URL: <http://projects.innovbusiness.ru/>.

Цель данной статьи – проанализировать процесс информатизации современного общества на предмет выявления его позитивных и негативных составляющих. Информатизация – наиболее значимая и абсолютно закономерная составляющая процесса развития общества. На наш взгляд, сам факт интенсивного совершенствования информационных технологий свидетельствует о том, что в данных условиях – это наиболее оптимальный вариант развития цивилизации.

Информатизация – это социально-техногенный процесс разработки, создания и массового внедрения инфокоммуникативных технологий (ИКТ) во все сферы жизни и деятельности для достижения и поддержания уровня информирования населения (общества), необходимого и достаточного для кардинального улучшения условий труда и жизни каждого человека [2, с. 3].

Слово «технология» имеет греческие корни и в переводе означает науку, совокупность методов и приемов обработки или переработки сырья, материалов, полуфабрикатов, изделий и преобразования их в предметы потребления. Современное понимание этого слова включает и применение научных и инженерных знаний для решения практических задач. В таком случае информационными и телекоммуникационными технологиями можно считать такие технологии, которые направлены на обработку и преобразование информации. Информационные и телекоммуникационные технологии – это обобщающее понятие, описывающее различные методы, способы и алгоритмы сбора, хранения, обработки, представления и передачи информации. Сущностным звеном информационно-коммуникативных технологий являются информационные средства коммуникации. Это материальные, технические средства, такие как телевизор, компьютер, радиоприемник, телефон, смартфон, айфон и др.

Решающим фактором перехода к информационному обществу, несомненно, стала компьютеризация. Прежде, чем предпринять какие-то действия, современному человеку необходимо провести большую работу по сбору и переработке информации, ее осмыслению и анализу. Отыскание рациональных решений в любой сфере требует обработки больших объемов информации, что подчас невозможно без привлечения специальных технических средств, в первую очередь, компьютеров. Компьютеризация – лишь один из аспектов информатизации общества, но на сегодняшний день именно он наиболее актуален.

Изобретение новых способов получения информации (веб-камеры, он-лайн общение), типов носителей информации (жесткие диски, CD-, DVD-диски, флеш-карты и др.) и способов ее хранения способствует расширению возможностей человека. Внедрение информационных технологий в современную жизнь обусловило интенсификацию различных видов человеческой коммуникации:

1) интенсификация прямых (межличностных) коммуникаций (посредством скайпа, мобильного телефона, электронной почты и т. п.);

2) интенсификация опосредованных коммуникаций (электронные носители информации, цифровое телевидение, Интернет-сайты, электронные библиотеки и т. п.).

В целом интенсификация инфокоммуникации способствует расширению социального контроля. В XXI в. человек не может игнорировать информационные процессы ни ментально, ни физически, не может себя полностью изолировать от них. Мир за два-три последних

десятилетия стал более «прозрачен» именно благодаря развитию техники и информатизации общества. Такая «прозрачность» влечет за собой как позитивные, так и негативные последствия для индивида, индивидуальности, личности.

Позитивные последствия:

1) человек может своевременно сигнализировать о своем положении в соответствующие инстанции, получает более качественную, своевременную и эффективную защиту своих прав со стороны государства;

2) человек увеличивает сферу своего социального общения, расширяет и укрепляет социальные связи. Постоянно возрастающее число участников социальных сетей (Facebook, MySpace или Одноклассники и ВКонтакте в Рунете) указывает на удобство использования и высокую социальную значимость последних;

3) интенсификация инфокоммуникации позволяет быстро получить необходимую информацию, избавляет от рутинной работы, что позволяет быстро реагировать на вызовы среды. Возможность следить в реальном времени за протеканием различных процессов и участвовать в них он-лайн повышает информативную осведомленность индивида, усиливает и расширяет сферу влияния конкретного человека;

4) увеличивается число возможностей для реализации творческого потенциала.

Все это обуславливает психологический и физиологический комфорт индивида.

Негативные последствия:

1) сокращение личного пространства и уменьшение степени личной свободы (возможности современной техники позволяют вычислить местонахождение человека, род его занятий, получить о нем обширную информацию). Миллионы людей публикуют самые интимные факты своей жизни на сайтах вышеупомянутых социальных сетей. Некоторые компании успешно убеждают своих клиентов делиться частной информацией в обмен на услуги);

2) свертывание социальных контактов в реальной жизни, сокращение практики социального взаимодействия без технических посредников, индивидуализм;

3) техногенные катастрофы, с последствиями которых человечество не в состоянии справиться;

4) рассогласование биологических возможностей человека (физиологических, психологических особенностей) с темпами технического прогресса и темпами информатизации общества.

Информатизация социума имеет три вектора направленности:

- информационный процесс формирования знаний, умений, мировоззрения, т. е. процесс обучения с использованием информационно-коммуникативных технологий;

- информационный процесс, связанный с профессиональной деятельностью человека, реализуемый при помощи информационно-коммуникативных технологий;

- информационный процесс, направленный на развлечения и получение удовольствия.

История человечества показывает, что при переходе к новым формам деятельности становление новой социальной системы более или менее быстро приводит к тому, что абсолютное большинство населения включается именно в эти формы деятельности и дальнейшее развитие общества осуществляется за счет их совершенствования. Но эта модель не может быть в полной мере использована для рассмотрения современного этапа станов-

ления информационного общества. Абсолютное большинство человеческого общества принципиально не может заниматься разработками, внедрением и использованием информационных технологий, так как в таком случае нивелируются природный и собственно человеческий аспекты бытия. Опыт и достижения предыдущих поколений необходимо учитывать при движении по пути прогресса, не отбрасывать как отработанный материал, неприемлемый для использования в современных условиях, а с большим вниманием и тщательностью его исследовать для извлечения полезной информации. Например, используемые нашими предками в период расцвета аграрной цивилизации орудия труда применяются на приусадебных участках современных садоводов и огородников не менее активно, чем последние технические новинки. И иногда первые оказываются более удобными, эффективными, рентабельными, чем последние. Для того чтобы открыть заблокированные специализированными информационными датчиками двери при аварии на атомной электростанции оптимальным вариантом может оказаться не новейшая компьютерная программа, а лом.

В свое время Н. Винер предполагал, что компьютеризация общества приведет к скачкообразному росту безработицы². Внедрение компьютерных технологий в материальное производство действительно приводит к сокращению числа необходимых рабочих рук. На смену высококвалифицированным электрикам, столярам, литейщикам, сборщикам различных механизмов приходят роботизированные машины, управляемые одним высококвалифицированным специалистом в области информационных технологий. Например, один завод по производству автомобилей могут обслуживать две-три сотни человек вместо двух-трех тысяч, как было в прошлом веке. Данная особенность процесса развития информатизации носит, на наш взгляд, негативный характер.

Научная разработка и внедрение новых информационных технологий обусловили интеграционные процессы в современном мире, тенденцию к межкультурному взаимодействию, породили понятие глобализации. По сравнению с индустриальным обществом, где все направлено на производство и потребление товаров, в информационном обществе будут производиться и потребляться интеллект, знания, что приведет к увеличению доли умственного труда. От человека потребуются способность к творчеству, возрастет спрос на знания. Настоящее время наиболее ярко, пожалуй, за весь период существования человеческой цивилизации демонстрирует, что знания, наука действительно являются «двигателем прогресса». Наука обуславливает не только социальный, но и собственно научный прогресс. В связи с самодетерминацией науки появились новые объекты научных исследований, новые методологии, возник ряд новых научных дисциплин. Процесс информатизации повлек за собою в науке как сфере человеческой культуры серьезные изменения.

Именно в сфере науки существует устойчивая тенденция снижения производительности труда. Современный ученый в среднем производит меньше информации, чем ученый XIX в. [3, с. 23]. В процессе информатизации происходит облегчение и ускорение процессов освоения обществом новых научных результатов. Это, в свою очередь, приводит к снижению их ценностного уровня в глазах обывателя и в целом ведет к определенной девальвации этих результатов, что можно определить как негативное последствие

² Виннер Н. Кибернетика и общество. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1958. URL: <http://filosof.historic.ru/books/item>.

процесса информатизации. С другой стороны, увеличение общего числа ученых, специалистов, занятых в научной сфере, влечет за собою и увеличение числа научных открытий, что является позитивным следствием информатизации общества.

Активное использование современных информационных технологий является залогом успешности и востребованности современного ученого. Использование информационно-коммуникативных технологий в работе обостряет проблему повышения квалификации преподавателей, увеличения их навыков и умений в информационной сфере и требует использования новых приемов педагогической работы. Значительно усложняется в содержательном и техническом смыслах деятельность преподавателей по разработке курсов в соответствии с новыми государственными образовательными стандартами. В процесс образования достаточно интенсивно интегрируется система дистанционного обучения, формируются универсальные учебно-наглядные комплексы с системой удаленного доступа для проведения занятий.

На сегодняшний день роль информации и процесса информатизации трудно переоценить. Овладение достоверной информацией обогащает и, как правило, облегчает нашу жизнь. Среди научных дисциплин, направленных на создание и внедрение информационно-коммуникативных технологий, особое место занимает информатика. Информатика – это наука о средствах передачи, хранения, представления, обработки и защиты информации. Информатика как обязательная общенаучная дисциплина введена в средней и высшей школе независимо от профиля подготовки специалистов. Умение использовать в повседневной жизни информационно-коммуникативные технологии – неотъемлемая часть образа жизни современного человека. В вузах и среднеспециальных учебных заведениях производится подготовка специалистов по широкому профилю направлений в области информатики и вычислительной техники. С появлением компьютерных сетей расширились образовательные возможности и методология обучения в общеобразовательной средней школе. Учителя и школьники приобрели новую возможность оперативно получать информацию из любой точки земного шара. Через глобальную телекоммуникационную сеть Интернет возможен мгновенный доступ к мировым информационным ресурсам (электронным библиотекам, базам данных, хранилищам файлов и т. д.). Безусловно, такая динамика процесса образования носит положительный характер.

Однако наряду с преимуществами здесь есть и крупные недостатки процесса получения образования, связанные с тотальной информатизацией. Увеличение значимости индивидуального подхода в процессе обучения с внедрением ИКТ наряду с позитивными моментами имеет и негативные. Индивидуализация сводит к минимуму ограниченное в учебном процессе живое общение преподавателей и обучаемых, учащихся между собой, предлагая им общение в виде «диалога с компьютером». Это приводит к тому, что обучаемый, активно пользующийся живой речью, надолго замолкает при работе со средствами ИКТ. Орган объективизации мышления человека – речь – оказывается выключенным, обездвиженным в течение многих лет обучения, а затем и рабочей деятельности. Обучаемый не получает достаточной практики диалогического общения, формирования и формулирования мысли на профессиональном языке.

Наибольшую трудность представляет собой переход от информации, циркулирующей в системе обучения, к самостоятельным профессиональным действиям, иначе говоря, от знаковой системы как формы представления знания на страницах учебника, экране дисплея и т. п. к

системе практических действий, имеющих принципиально иную логику, нежели логика организации системы знаков. Это классическая проблема применения знаний на практике, формальных знаний, а на психологическом языке – проблема перехода от мысли к действию.

Определенные трудности и негативные моменты могут возникнуть в результате применения современных средств ИКТ, предоставляющих пользователям значительную свободу в поиске и использовании информации. При этом люди зачастую неспособны грамотно воспользоваться той свободой, которую предоставляют современные информационно-коммуникационные средства. Нелинейная структура информации подвергает человека «соблазну» следовать по предлагаемым ссылкам, что при неумелом использовании может отвлечь от основного русла поиска. Часто запутанные и сложные способы представления информации могут стать причиной отвлечения от изначально искомого материала из-за различных несоответствий. Колоссальные объемы информации, представляемые некоторыми средствами информатизации, такими как электронные справочники, энциклопедии, также могут отвлекать внимание.

Более того, кратковременная память человека обладает очень ограниченными возможностями. Как правило, обыкновенный человек способен уверенно помнить и оперировать одновременно лишь семью различными мыслимыми категориями. Когда человеку одновременно демонстрируют информацию разных типов, может возникнуть ситуация, в которой он отвлекается от одних типов информации, чтобы уследить за другими, пропуская важную информацию.

Использование информационных ресурсов, опубликованных в сети Интернет, часто приводит к отрицательным последствиям. Чаще всего при использовании таких средств ИКТ срabатывает свойственный всему живому принцип экономии сил: заимствованные из сети Интернет готовые идеи, проекты, публикации, решения задач стали сегодня привычным фактом, не способствующим повышению эффективности образовательного, воспитательного и рабочего процессов.

Информационно-коммуникативные технологии в значительной степени формируют личность современного человека: его вкусы, интересы, круг знакомств, интеллектуальный потенциал. В процессе информатизации общества формируется новая информационная культура. Постепенно меняется уклад жизни, система ценностей, возрастает значимость культурного досуга по отношению к материальным ценностям.

Информатизация общества способствует решению глобальных проблем человечества. Без развития технических наук и наращивания темпов информационно-коммуникативных технологий это решение не представляется возможным. Так, в течение ближайших десяти лет (согласно демографическим прогнозам) население Земли при нынешнем приросте населения увеличится на полмиллиарда. Мир должен изыскать средства для комфортного проживания всех людей, для удовлетворения потребностей человечества. При этом необходимо параллельно решать различные задачи:

1) в меньшей степени использовать химические удобрения и бициды из-за опасности для здоровья и загрязнения биосферы;

2) произвести столько энергии, сколько ее было произведено за всю предшествующую историю человечества при том, что наращивать производство энергии становится труднее и уже сегодня треть населения планеты испытывает нехватку современных видов топлива, также нужно одновременно ликвидировать, например, кислотные дожди;

- 3) удовлетворить возросшие потребности в продуктах питания, сырье и промышленных товарах при том, что ресурсы иссякают, а безопасно хранить отходы становится труднее;
- 4) радикально улучшить условия жизни, работы, образования, городской и окружающей среды как в развитых, так и в развивающихся странах;
- 5) одновременно повысить стандарты здравоохранения всех стран, перейти от лечения болезней к их предотвращению;
- 6) увеличить занятость, создав новые рабочие места;
- 7) удерживать инфляцию;
- 8) выполнить все названные задачи без необратимого нарушения природного равновесия или ресурсного кризиса, способного привести к войне или техногенной, природной (спровоцированной техническим прогрессом) катастрофе.

Подведем некоторые итоги. Позитивные последствия информатизации общества:

- 1) людям предоставляются максимальные возможности для самореализации;
- 2) улучшается качество обучения, работы, проведения досуга;
- 3) материальный продукт станет в большей степени информационно-емким;
- 4) возрастет значимость культурных ценностей.

Негативные последствия процесса информатизации социума в целом можно свести к следующему:

- 1) увеличение зависимости индивида от ИКТ;
- 2) ИКТ могут разрушить частную жизнь людей и организаций;
- 3) распространение ложной информации, усложнение отбора качественной и достоверной информации;
- 4) расслоение общества на информационную элиту и зависимых от нее потребителей-пользователей;
- 5) информатизация может спровоцировать психофизиологический дисбаланс в человеке;
- 6) информатизация способна усилить разрушение биосферы планеты.

Таким образом, в процессе информатизации современного общества, с одной стороны, улучшается качество жизни человека, что является, безусловно, позитивным аспектом этого процесса. С другой стороны, информатизация общества имеет серьезный негативный аспект: как и любое новое явление, феномен, она способна порождать новые цепочки проблем, с которыми человечество на данном этапе своего развития справиться не в состоянии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тоффлер Э. Третья волна. М.: АСТ, 2010. 784 с.
2. История информатики и философия информационной реальности: Учеб. пособие для вузов / Под ред. чл.-кор. РАН Р. М. Юсупова, проф. В. П. Котенко. М.: Академический Проект. 2007. 429 с.
3. Казаринов М. Ю. Информация: контуры философско-методологического исследовательского проекта. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004. 120 с.

V. V. Kalinina

TO THE QUESTION ABOUT THE POSITIVE AND NEGATIVE ASPECTS OF THE PROCESS OF INFORMATIZATION OF THE MODERN SOCIETY

The information and processes of information of a modern society are considered essence of concept. Positive and negative aspects of information of society come to light. The philosophical analysis of information technology in which frameworks the attention is focused on axiological measurement of process of information is carried.

Informatization, information society, information and communication technologies, information, technical progress

НОВАЦИИ СОВРЕМЕННОГО КОММУНИКАТИВНОГО ПРОСТРАНСТВА

Анализируются особенности современного коммуникативного пространства. Рассматриваются специфика современных процессов информодинамики и их влияние на потребителя информации.

Современное коммуникативное пространство, информодинамика, модели поведения, имидж, деловой этикет, корпоративная культура

Информационная революция открыла новую эпоху в развитии человечества, которая характеризуется существенными изменениями во всех сферах его жизнедеятельности. Современное общество находится на пороге глобального перехода к качественно новой информационной цивилизации. Важнейшим показателем информационной цивилизации является быстрое развитие и внедрение новых технологий в информационно-компьютерной среде, что приводит к формированию принципиально новых явлений и процессов, в том числе и коммуникативного характера. По мнению западных специалистов, новые коммуникации и информация – это уже контролируемый ресурс, социальный мозг и нервная система общества [1, с. 125–126]. Задача данной статьи – анализ специфических особенностей современного коммуникативного пространства.

Насыщенность современной информационной среды трансформировала сам процесс информодинамики, подчинила его новым законам. В настоящее время способ передачи информации имеет важное влияние на определение ее значения. Центральными каналами передачи информации сегодня являются телевидение и Интернет. Эти каналы информации объединяет экранное изображение и его возможности.

Например, современные способы информодинамики обладают свойствами интерактивности, поэтому приветствуют и даже провоцируют обратную связь с потребителем информации, создавая иллюзию включенности в происходящее. В первую очередь речь идет, конечно, о телевидении как наиболее массовом канале коммуникации. Многие новостные и развлекательные программы принимают и поощряют информационные сюжеты от зрителя. Интерактивные формы общения, такие как, например, sms- или Интернет-голосования, способны повлиять на восприятие информации и на дальнейшее развитие сюжета. Еще большие возможности дает Интернет. В Интернете можно выложить и получить абсолютно любую информацию. Самостоятельное ведение блогов и создание форумов дает возможность не только передавать информацию, но и задавать ее направление. В результате субъект приобретает представленность в жизнедеятельности других людей. Потребность в самовыражении удовлетворяется посредством активного участия в совместной деятельности путем приобщения других пользователей к своим интересам и желаниям.

Интернет, действительно, дает новые возможности проявить себя, высказать свою собственную позицию, позиционировать себя через создание собственной страницы. Форумы и социальные сети позволяют общаться тысячам, миллионам людей. Они позволяют разделить общение на темы и категории. Таким образом, каждый общается там, где ему ин-

интересно. Чаты и ICQ дают возможность дистанционно общаться в реальном времени. Через Интернет можно найти работу, друзей и даже влюбиться. Возможности сети практически безграничны. В настоящее время через Интернет можно делать почти все – зарабатывать деньги, делать покупки, оплачивать счета, заказывать авиабилеты, рекламировать свои товары и фирмы, смотреть фильмы, слушать музыку, получать последние новости и т. п. В то же время при всей внешней привлекательности телевидения и Интернета ученые подчеркивают их негативное влияние на современного человека и общество в целом.

Исследования показали, что технологические особенности электронной проекции включают проникновение в кадр по оси взгляда, в результате чего более естественным оказывается движение не вглубь, а вдоль экранной плоскости. Это делает скорость главным фактором восприятия, а установка на скоростное потребление визуального ряда, в свою очередь, исключает вчитывание в глубину кадра, что приводит к разрыву между восприятием образа и его осмыслением. Вследствие чего происходит пассивное восприятие текстов и, как результат, – снижение интеллектуальной активности со стороны потребителя информации [2, с. 46]. Ученые обращают внимание и на такую технологическую особенность экранной проекции как максимальное сближение происходящего с информацией о происходящем. В результате, как подчеркивают специалисты, на каком-то этапе временной зазор становится неразличим, что ведет к разрушению реальности с помощью создания симулякров, человек становится заложником мира вторичных изображений.

Однако не только технологические особенности электронной проекции воздействуют на наше сознание. В условиях, когда каждый день на человека обрушиваются большие объемы информации, передаваемой вне всякой последовательности, происходит постепенная потеря логики и смысла и, как следствие, наступает эмоциональная глухота и безразличие ко всему происходящему. Данный процесс получил название наркотизации. Под наркотизацией в теории коммуникации понимают процесс наполнения сознания потребителя информации большим количеством хаотично передаваемых сообщений без возможности их осмысления. Именно по такому принципу построены сегодня все современные новостные дайджесты, проблемные ток-шоу, циклы разоблачительных передач, размещение ссылок и рекламные баннеры на Интернет-страницах. В свою очередь, снижение способности осознавать поступающую информацию с необходимостью ведет к борьбе за потребителя, при этом основным средством становится направленность на бессознательные инстинкты. Однотипные развлекательные шоу, криминальные новостные программы, многочисленные ситкомы, развлекательные сайты и он-лайн-игры направлены, в первую очередь, на удовлетворение низменных человеческих желаний и потребностей, что не только не способствует нравственному развитию личности, а напротив – ведет к духовной деградации.

Самым же опасным для современного потребителя информации является содержание этой информации. Согласно статистике, приведенной в газете «Аргументы и факты», в среднем на один час телепоказа в России приходится 4,2 сцены насилия [3, с. 4]. Это удручающие цифры, но последствия еще страшней. «АиФ» приводит данные европейских исследований, согласно которым 20 % реальных актов насилия спровоцированы увиденным по телевидению, а в США 61 % преступников нарушают закон, копируя телегероев или героев компьютерных игр. К большому сожалению, такого рода негативная информация стала преобладаю-

щей и в Интернете. В Интернете существуют клубы самоубийц; клубы наркоманов; клубы, обучающие начинающих террористов. В Интернете содержится много информации порнографического характера. Интернет породил целую общность, которая получила название «хакерство». «Хакерами» называют настоящих знатоков и профессионалов в сети Интернет. Хакерство приносит своим последователям моральное удовлетворение, но, к сожалению, хакеры чаще позиционируют себя не через созидание, а через разрушение.

Своеобразной защитой современного потребителя информации от бесконечного числа пессимистических текстов стала концентрация внимания на своих собственных проблемах и заботах, на проблемах и заботах своих близких. Этот процесс получил название «персонализация». Люди спасают свою психику от воздействия пессимистических текстов, замыкаясь в мире своих частных интересов, их все меньше и меньше интересует то, что происходит вокруг. В частности, процесс персонализации можно проиллюстрировать на примере действия такой поведенческой модели как «лидеры мнения». Данный термин принадлежит профессору социологии Колумбийского университета П. Лазарсфильду и его коллегам. В результате эксперимента по исследованию восприятия текста выяснилось, что уровень его воздействия через две недели оказался выше, чем сразу после непосредственного его прочтения. Возрастающее позже воздействие информации объяснялось обсуждением ее с другими людьми, которые стали именоваться «лидерами мнений» (opinion leaders). Смысл данного явления заключается в том, что человек как бы нуждается в объяснении и оценке ситуации и в качестве «эксперта» выбирается кто-то из своего окружения. Лидера мнений спрашивают о его понимании ситуации, так как он лучше информирован о происходящем. Его авторитет заставляет других прислушиваться к его мнению. Информация, исходящая от «лидеров мнений», несет личностные оценки ситуации, поэтому провоцирует доверительное к ней отношение. Современные способы подачи материала в средствах массовой информации активно участвуют в процессе влияния «лидеров мнения» на аудиторию.

Сегодня и Интернет приобрел высокий статус «лидера мнения». В первую очередь это связано с быстротой и доступностью любой информации в любое время. Многочисленные Интернет-форумы предназначены для обсуждения и, как следствие, формирования «собственного» мнения. Относительная анонимность интернет сообщений и дистанцирование автора делает притягательнее возможность поделиться своим мнением, поучаствовать в формировании мнения другого. Однако степень достоверности таких сообщений никем не регулируется. Регулятором выступают только внутренние, этические правила, но всегда ли они соблюдаются. В сети возможен уход от реальности посредством создания себе искусственного образа, виртуально изменяя свой пол, возраст и т. п. Интернет дает иллюзию вседозволенности, культивируя тем самым безнравственность и безнаказанность. Именно поэтому проблема нравственного воспитания, особенно в рамках формирования личности подростка, приобретает сегодня особую значимость.

Еще одной характерной чертой современного коммуникативного пространства стал процесс селективности, который выражается в том, что в процессе обработки информации потребитель отбирает только те сведения, которые соответствуют его представлениям о действительности, считая несущественным или даже лживым все, что не соответствует этим представлениям. Порождая у аудитории потребность отгородиться от нежелательной инфор-

мации, современное телевидение и Интернет в то же время активно способствуют удовлетворению такой потребности, открывая новые каналы, программы, Интернет-сайты и форумы, ориентированные на целевую аудиторию, замыкая таким образом круг ее интересов. В свою очередь, постоянная «привязка» к компьютеру, жизнь в виртуальном пространстве негативно сказываются на функциях высшей нервной деятельности, эндокринной, иммунной и репродуктивной системах, на зрении и костно-мышечном аппарате человека. По мнению специалистов, под угрозой находится не только психическое, морально-этическое, но и физическое здоровье нации. Современному человеку, проживающему свою жизнь в сети, необходима социальная поддержка, у него большие трудности в общении, низкая самооценка, он испытывает закомплексованность и неудовлетворенность в реальной жизни.

Процессы наркотизации, персонализации, селективности родственны по своему содержанию, происхождению и последствиям. С одной стороны, эти процессы выступают как коммуникативные формы психологической защиты от неиссякаемой лавины сообщений, с другой – это благоприятная почва для прорастания равнодушия, цинизма, потребительского отношения к жизни. Прогнозы специалистов даже на ближайшее будущее малоутешительны. Наложённые на специфику развития рыночных отношений в нашей стране, на экономические и социальные трудности эти процессы способствуют росту собственнических интересов и настроений, духовному обнищанию людей. Отсутствие четких нравственных ориентиров в обществе, забытая воспитательная функция СМИ провоцируют вседозволенность и во многом способствуют росту потребительских тенденций в обществе. Таким образом, несмотря на то, что процессы наркотизации, персонализации и селективности выступают в роли психологических механизмов, они, в конечном итоге, ведут к негативным социальным последствиям, опасным для нашего менталитета. Однако в силу того, что современное цифровое телевидение и Интернет формируют Единое информационное пространство, все процессы информодинамики, а значит, и их последствия имеют глобальный характер. Проиллюстрируем это на примере новых моделей коммуникативного поведения.

Важным показателем успешности в современном обществе является умение выгодно себя продать. Отсюда еще одна характерная особенность современного коммуникативного пространства – доминирование внешней формы над содержанием. Ухоженный внешний вид, хорошие манеры, умение подавать себя становятся определяющими условиями признания и поддержки со стороны общественного мнения. Сегодня любой специалист, политик или бизнесмен может не достичь желаемого результата, если он не использует новые модели поведения, основанные, прежде всего, на внешнем признании. Ориентация на внешний фактор, смена модели поведения от внутренне ориентированного типа к внешне ориентированному также являются следствием перенасыщенности информационной среды; когда нет возможности ближе узнать другого, общественное мнение ищет опору во внешних характеристиках [4, с. 17–18].

Появление новых моделей поведения с необходимостью сопровождается и появлением нового инструментария. Сегодня можно уже с уверенностью сказать, что в качестве такого инструментария выступают имидж и деловой этикет. И имидж, и деловой этикет являются сложными, многофакторными коммуникативными структурами, поэтому полностью удовлетворяют новому инструментарияю [5, с. 118].

Деловой этикет – это новый вид этикета, новая форма делового общения, отвечающая потребностям развивающегося рынка и процессам демократизации общества. Что касается имиджа, то как таковой он не является сегодняшним изобретением. Специалисты считают, что имиджи фараонов, генсеков и президентов по сути своей лежат в одной плоскости. Однако в настоящее время роль имиджа в политической, деловой и общественной жизни значительно возрастает.

Возрастание роли и значения имиджа в современных условиях имеет ряд объективных причин. Во-первых, это перенасыщенность информационной среды, что является следствием наступления информационной цивилизации и развития рыночных отношений; во-вторых, процесс эстетизации потребностей, который распространяется сегодня не только на материальную, но и на духовную культуру, в том числе и на культуру общения. Эти же причины лежат в основе появления и востребованности и делового этикета. И имидж, и деловой этикет выступают как новые формы социального взаимодействия, как современные информационные структуры, как единицы измерения современного коммуникативного пространства [5, с. 120]. Ориентация на внешний фактор стоит достаточно далеко от процессов наркотизации, персонализации и селективности, но все коммуникативные процессы и явления объединены между собой причинно-следственными связями. Например, процесс персонализации проявляется в том, что человек, спасаясь от бесконечного числа негативных сообщений, уходит в мир собственных проблем и для того, чтобы привлечь его внимание к чему-либо, нужно предложить такую информацию, которая бы его заинтересовала. В настоящих условиях это может быть обеспечено исключительно с помощью внешнего фактора и, прежде всего, использования актерской модели воздействия. Именно такая модель воздействия оказалась наиболее эффективной, поэтому модели потребления предопределяют все наше сегодняшнее поведение.

Однако в современных условиях востребованность новых моделей поведения, основанных на внешнем признании, характерна не только для отдельного человека, но и для всех видов организационных структур. В формировании моделей организационного поведения принимает участие уже другой современный инструментарий – это корпоративная культура организации, которая по своим параметрам и степени сложности не просто превосходит имидж и деловой этикет, но и включает их в качестве структурных составляющих своего единого целого.

Понятие «корпоративная культура» было введено в научный и управленческий оборот в 90-е гг. прошлого века усилиями западных ученых. По мнению специалистов, новое понятие, с одной стороны, отразило те новации, которые произошли в процессе перехода от индустриального к постиндустриальному (информационному) обществу, с другой – закрепило в качестве основного управленческого инструментария человеческий фактор с главным акцентом на его духовную составляющую.

Корпоративная культура – это важный инструмент формирования современных моделей организационного поведения, это новый уровень менеджмента, отвечающий потребностям современного развития общества, это новый социокультурный феномен, отражающий ведущие тенденции общественного развития в условиях глобализации и роста рыночных отношений.

В настоящее время проблематика корпоративной культуры особо актуализируется в связи с прогнозами специалистов, по мнению которых, на смену экономики услуг идет экономика впечатлений и ее новации. Новая экономика реализует себя, в первую очередь, через шоулилизацию бизнеса, отсюда потребность в новом виде перфомансов – бизнес-перфомансов, нацеленных непосредственно на самого потребителя. С данной проблемой впервые столкнулись американцы. Театрализация продаж и борьба за клиента стали теми необходимыми мерами, без которых уже невозможно отвоевывать себе место на современном американском высококонкурентном рынке товаров и услуг. Однако разразившийся мировой экономический кризис резко стагнировал эти процессы, поэтому специалисты сегодня определяют шоулилизацию бизнеса как одну из закономерностей современного сверхконкурентного рынка, с которой все-таки придется столкнуться всем экономически развитым странам. В свою очередь, это потребует сильной корпоративной культуры, способной выстраивать стратегию развития всех отношений, в которые вступает организация, включая отношения «фирма – клиент».

Таким образом, изменения, произошедшие сегодня в передаче сообщения, определяют современную коммуникацию как качественно новый процесс, где многие привычные параметры становятся достоянием прошлого. В целом это означает, что становление и развитие информационной цивилизации сопровождается формированием нового коммуникативного пространства, соответствующего данной цивилизационной стадии развития общества. Однако информационно-коммуникативные процессы, формирующие это пространство, имеют очень разные по своей сути и значению последствия как для отдельного человека, так и для общества в целом. Современные каналы и процессы информодинамики приводят к утрате связи с реальностью, потере и симуляции смысла, к тому же часто имеют манипулятивный характер. Поэтому особую значимость в современных условиях приобретает проблема нравственности и нравственного воспитания, а все новации современного коммуникативного пространства требуют пристального внимания со стороны общественности и мирового научного сообщества с целью возможного устранения их негативного влияния на будущее человечества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смеричевский Э. Ф. Информационная цивилизация: проблема виртуальной реальности в общественном развитии. Донецк: ДонНМУ, 2003. 181 с.
2. Волков А. И. Телекоммуникации в контексте их влияния на человека // Междунар. науч. конф. «Информация. Коммуникация. Общество» (ИКО-2001), Санкт-Петербург, 13–14 нояб. 2001: тезисы докл. и выст. СПб., 2001. С. 46–48.
3. Зятков Н. Кровь-ТВ // Аргументы и факты. 2011. № 13.
4. Почепцов Г. Г. Профессия Имиджмейкер. СПб.: Алетейя, 2001. 181 с.
5. Мамина Р. И. Современный деловой этикет (философско-культурологический анализ). СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2002. 176 с.

R. I. Mamina, E. V. Pirainen

INNOVATIONS OF MODERN COMMUNICATIVE SPACE

Features of modern communicative space are analyzed. Specificity of modern channels of information transfer and their influence on the information consumer is considered.

Modern communicative space, information transfer, behavior models, image, business etiquette, corporate culture



УДК 621.37 – 621.396 (091)

В. Ю. Рогинский

КРАТКИЙ ОЧЕРК НАУЧНОЙ, ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ И ОБЩЕСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КОВАЛЕНКОВА ВАЛЕНТИНА ИВАНОВИЧА¹

Приведены основные факты из жизни студента и выпускника ЭТИ (1909), ученика А. С. Попова, лауреата премии им. А. С. Попова (1916), профессора ЛЭТИ, крупного ученого, специалиста в области проводной связи, автоматики и телемеханики, члена-корреспондента АН СССР В. И. Коваленкова. Особый интерес представляют воспоминания самого В. И. Коваленкова о работе над созданием первой в мире телефонной трансляции на электронной лампе. Экземпляр статьи В. Ю. Рогинского, выпускника и преподавателя ЛЭТИ, много лет хранился в машинописном виде в фонде Музея истории «ЛЭТИ».

Телефонная трансляция, звуковое кино, механическая звукозапись, телевидение, лаборатория АН СССР

Патентные заявки на все работы по телефонной трансляции были поданы В. И. Коваленковым 2 августа 1919 г. (*информация о выдаче патентов № 3226 и 3227 была опубликована 30 июля 1927 г. – Л. 3.*). В них были зарегистрированы пять разновидностей телефонных трансляций. В патенте № 3226 были описаны два варианта телефонной трансляции по дифференциальному способу с применением двух катодных «разговорных» ламп (рис. 1), а в патенте № 3227 – три варианта телефонных трансляций по принципу моста Уитстона с применением четырех трансформаторов и двух «разговорных» ламп (рис. 2).

Опубликованная в США в 1919 г. схема телефонных трансляций не была похожа ни на одну из изобретенных Валентином Ивановичем. Лишь в 1930 г. в США стали применять одну из запатентованных В. И. Коваленковым схем телефонных трансляций в связи с разработкой универсальной схемы транзитных соединений. Более того, одна из схем В. И. Коваленкова принята в настоящее время в качестве универсальной схемы почти всеми странами мира.

Схемы телефонной трансляции, изобретенные В. И. Коваленковым, несмотря на трудности времен Гражданской войны, быстро внедрялись в систему телефонной связи СССР. В 1921 г. коллегия НТО ВСНХ обсудила доклад В. И. Коваленкова и приняла ре-

¹ Часть 2 (начало в предыдущем номере).

шение об «...исключительно важном значении данного изобретения для техники связи». Это решение было принято 29 июня, а уже 5-го октября 1921 г. Совет труда и обороны заслушал доклад Президиума ВСНХ о телефонной трансляции и постановил:

«...1. Произвести опытную установку трансляции на ст. Бологое на одном из проводов Петроград – Москва и 2-х оконечных аппаратов Москва – Кремль и Петроград – Смольный.

2. Оборудовать подвижную лабораторию-вагон для исследования линий Петроград – Москва в целях установки трансляции и применения железных проводов для междугородного телефонирования; на линии Москва – Нижний Новгород для исследования для той же цели имеющихся алюминиевых проводов.

3. Поручить Наркомату Путей сообщения срочно для создания лаборатории-вагона предоставить в распоряжение НТО классный вагон, приспособив его для этой цели согласно указаниям проф. Коваленкова...

Председатель Совета Труда и Оборон, В. И. Ульянов (Ленин)».

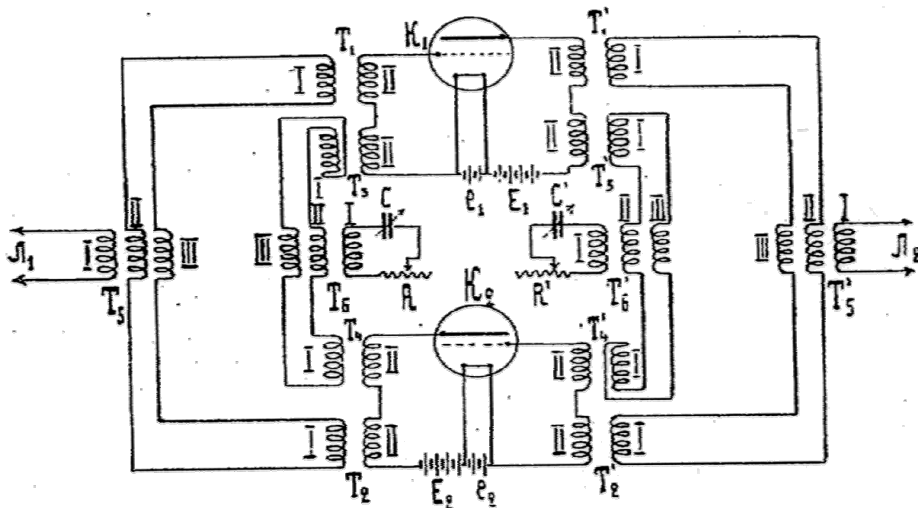


Рис. 1

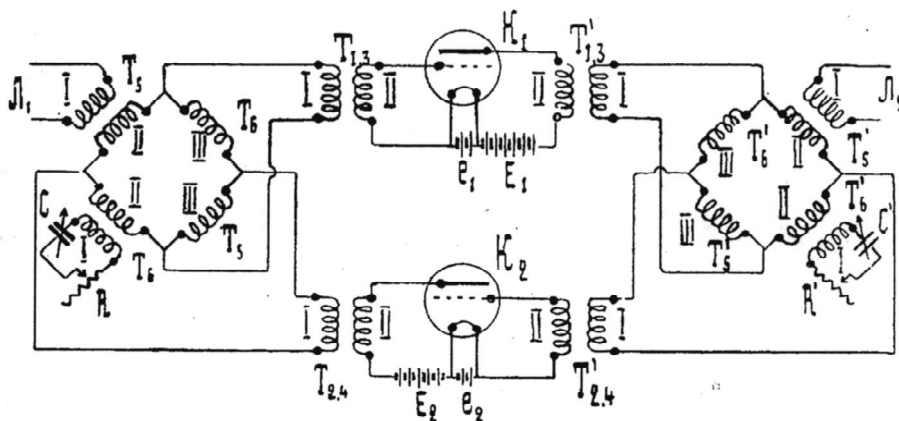


Рис. 2

С 1919 по 1927 гг. В. И. Коваленков получил по телефонной трансляции и [ее] усовершенствованию 29 патентов. Важнее же всех патентов было то, что телефонная трансляция В. И. Коваленкова внедрялась в систему связи. Уже в июне 1922 г. опытные образ-

цы были установлены на линиях Петроград – Нижний Новгород, Петроград – Харьков, Петроград – Ярославль. В октябре 1922 г. была установлена телефонная трансляция в г. Бологое на линии Москва – Петроград. В результате использования телефонной трансляции стали возможны такие линии связи, как самые длинные в Европе, протяженностью в 5400 км.

Телефонная трансляция для В. И. Коваленкова была практически целью и направлением деятельности на протяжении всей жизни. Но нельзя при этом забывать, что благодаря обычным схемам трансляции Валентин Иванович в содружестве со своим братом А. И. Коваленковым и другими исследователями внес много нового в систему высокочастотного телефонирования, в систему уплотнения цепей связи, в разработку идей радиорелейно-трансляционных систем, а также в связи с решениями этой задачи – в разработку ряда теоретических вопросов.

В. И. Коваленков является одним из основоположников многоканальной высокочастотной телефонной связи. 13 декабря 1921 г. Валентин Иванович и его брат А. И. Коваленков продемонстрировали в Петровском дворце перед специально созданной комиссией одновременную передачу трех телефонных разговоров по одной паре проводов, используя поднесущие волны в 300, 450 и 3000 м. Как известно, дальнейшее развитие высокочастотного телефонирования дало возможность значительно увеличить число одновременных разговоров по одной паре проводов за счет уплотнения каналов связи, доводя число до многих десятков и, соответственно, сближая между собою поднесущие частоты, используя все более совершенные методы и схемы модуляции и демодуляции. Начиная с этого, казалось бы, простейшего опыта и демонстрации развилась современная высокочастотная техника дальней связи.

В. И. Коваленков писал: «...Работы над телефонной трансляцией натолкнули меня на мысль о передаче телефонного разговора через ряд промежуточных радиостанций...». Разработанные им и запатентованные еще в августе-сентябре 1921 г. схемы позволили осуществить передачу телефонных разговоров из проводных линий связи на радиолинию и обратно в конце декабря 1922 г. По поводу изобретенных В. И. Коваленковым схем газета «Правда» писала: «...Только на днях, 30 ноября с. г., радиотелеграфная комиссия при техническом совете Наркомпочтеля признала имеющими первостепенное государственное значение новые радиотрансляции Коваленкова, которые дают возможность вместо дорогостоящих мощных радиостанций строить станции значительно меньшей мощности...».

Эти изобретения В. И. Коваленкова по сути можно считать основополагающими в современной технике радиорелейных и радиокабельных линий. Вот почему одну из своих статей Валентин Иванович и назвал «Изобретение телефонной и радиотрансляции».

Еще в 1921 г. В. И. Коваленков обосновал необходимость построения генеральной схемы междугородней телефонной связи и разработал принципы построения такой схемы. В статье «Ближайшие задачи междугородного телефонирования» (апрель, 1922) он писал: «...Практическое проведение телефонных трансляций совершает переворот в междугородном телефонировании. ...Только при наличии телефонных трансляций возможно рациональное проектирование гибкой телефонной сети в государственном масштабе. Только при наличии телефонных трансляций любой гражданин, где бы он ни находился, может с легкостью вызвать другого гражданина, находящегося от него хотя бы за тысячу верст... Только при наличии трансляций возможны удобные комбинированные линии проволочного и беспроводного телефона...».

(Теоретические исследования вопросов многократного телефонирования, проведенные профессорами В. И. Коваленковым и П. А. Азбукиным в период их деятельности в ЛЭТИ, послужили основой для разработки и конструирования первой в СССР установки, позволившей осуществить по одной телефонной цепи сначала два, а затем и несколько телефонных разговоров. Почти одновременно с вопросами многократного телефонирования был решен вопрос использования телефонной цепи, уплотненной несколькими каналами, и для телеграфной связи – Л. З.)

Насколько эффективно мог сочетать Валентин Иванович свои изобретательские способности с практикой внедрения их в эксплуатацию можно привести множество примеров. Так, по поручению Управления связи Красной армии в 1919 г. Валентин Иванович решил задачу организации в Москве завода по выпуску сухих элементов для разработанной им системы связи, который стал в то время единственным в Советском Союзе предприятием по их производству. Была решена проблема снабжения источниками питания аппаратуры связи в армии.

Не менее важными и интересными были работы В. И. Коваленкова по консультированию и участию в выпуске на отечественных заводах всевозможной аппаратуры связи, в том числе и в разработке новых схем и конструкций телефонных аппаратов для армии, улучшенных систем и аппаратов всех видов проводной связи.

Характер изобретателя и исследователя Валентина Ивановича проявился в его интересе к технике звукового кино. Как известно, когда говорят о технике звукового кино, то многое приписывается немецким изобретателям. Действительно, начало работам по технике звукового кино положил в 1901 г. берлинский физик Э. Румер. Немало сделали Г. Фогт, Й. Масоле, Д. Энгль и др. Техническое и практическое разрешение техники звукового кино было найдено лишь в 1920-х гг. Между тем, еще в 1919 г. Валентин Иванович подал заявку на говорящий кинематограф. М. Лапиров-Скобло² в газете «Правда» в 1922 г. писал: «...Сопоставляя работы В. И. Коваленкова с ныне обнародованными работами немецких изобретателей, произведенными ими на протяжении последних четырех лет, мы лишней раз должны констатировать чрезвычайно интересный факт почти совпадающего по времени одновременного разрешения в разных частях Европы разобщенными друг от друга изобретателями одной и той же задачи. Коваленков должен по праву считаться изобретателем говорящего кинематографа, разделяя эту честь с немецкими изобретателями... Подробное знакомство с работой Коваленкова и германских изобретателей указывает, что некоторые отдельные детали разрешены более остроумно и технически более совершенно В. И. Коваленковым».

Сказанное, в частности, относится к предложению В. И. Коваленкова воспроизводить звуковую запись оптическим путем, а запись осуществлять при помощи осциллографа. Известную схему фотоэлемент – телефон В. И. Коваленков предложил дополнить усилителем на электронных лампах, что практически осуществляется и до сих пор. В работе Валентина Ивановича, посвященной этой теме, он также указывает на возможность применения для записи газоразрядных приборов.

² Михаил Яковлевич Лапиров-Скобло (1889–1947) – электротехник, окончил в 1913 г. Варшавский политехнический институт, работал в электропромышленности; профессор, доктор технических наук, директор Научно-исследовательского института связи, был репрессирован. URL: <http://ru.wikipedia.org/>.

В одной из своих последующих патентных заявок В. И. Коваленков предложил и обосновал возможности звукозаписи при помощи низковольтной лампы накаливания, включенной в выходную цепь лампового усилителя звукосопровождающих киноленту сигналов. Лишь через восемь лет после предложения Валентина Ивановича удалось создать подобный модулятор света.

Еще более интересными и плодотворными оказались патентные предложения В. И. Коваленкова в части использования электронно-лучевой трубки для записи звука на киноленту, модулируя яркость свечения экрана трубки путем изменения потенциала модулирующего электрода трубки при включении в цепь этого электрода вторичной обмотки микрофонного трансформатора.

К работам В. И. Коваленкова по записи и воспроизведению звуковых сигналов в звуковом кино примыкает ряд его интереснейших работ по акустике и акустическим свойствам музыкальных инструментов, аппаратов и помещений; его предложение о 17-кратно-темперированной гамме для рояля, весьма приближающейся к естественной гамме (*обычно используется 12-кратно-темперированная гамма, включающая 7 основных тонов от «до» до «си» и 5 полутонов – Л. З.*), а также его методика синтеза звука и речи. В частности, это относится к следующим работам.

Механическая звукозапись – фотографирование звуков-букв, произносимых каким-либо лицом. В. И. Коваленков предложил подбирать азбуку звуков-букв, соответствующих гласным, согласным и их сочетаниям. По этой азбуке затем следует подбирать речь, пение, музыку. Например, сфотографировав все звуки рояля можно было бы затем воспроизвести игру с помощью схемы, в которую входит фотоэлемент, усилитель и звуковоспроизводящий аппарат (телефон, громкоговоритель).

Валентин Иванович предложил электроакустические резонаторы, причем тембр звука объяснялся им звуковым фоном, покрывающим речь, а фон считался характерным для каждого отдельного лица, не зависящим от высоты тона произносимых звуков. Изменяя этот постоянный фон, можно менять тембр речи или музыки. Электроакустические резонаторы можно было использовать для настройки помещения на тот или иной тембр. Резонаторы можно было также использовать наподобие камертонов при обучении музыке.

Оригинальным предложением было создание электрогармониума – рояля, в котором вместо струн предлагалось использовать катодные генераторы, в которых электрическим путем можно было менять частоту звучания, т. е. это был прототип разработанных позднее электромузыкальных инструментов большого класса с клавиатурой. Не менее оригинальным было предложение Валентина Ивановича создать «осведомительный телефонный аппарат», с помощью которого можно было при отсутствии абонента записать переданную информацию, а затем по мере надобности воспроизводить ее.

Валентин Иванович принимал также участие в разработке системы «видения по радио», как тогда называли современное телевидение. Эта работа выполнялась им в содружестве с Л. С. Терменом, который, как известно, также тяготел к разработкам электромузыкальных инструментов.

Рассматривая всю изобретательскую и научную деятельность В. И. Коваленкова, несмотря на многогранность его интересов, нельзя не отметить, что основной тематикой всей его деятельности оставались всегда вопросы электросвязи, а остальные направления были побочными. Это особенно остро ощущается при анализе его многочисленных теоретических работ.

(В 1930 г. по инициативе профессоров В. И. Коваленкова и Н. А. Скрицкого в ЛЭТИ была выделена специализация телемеханика, получившая дальнейшее развитие в 1935 г. в виде организации кафедры автоматики и телемеханики под руководством проф. В. А. Тимофеева – Л. З.)

Все теоретические разработки В. И. Коваленкова в области электросвязи поражают своей последовательностью и связностью. Это в равной мере относится и к более ранним (*первые работы были перечислены в первой части статьи – Л. З.*), и к более поздним работам. Можно проследить развитие и преемственность большой серии работ, посвященных телефонированию и телеграфированию, математическим методам анализа процессов, включая работы по «расщеплению сложных систем уравнений на простые». В равной мере удивительна преемственность и общность методики исследования проводных линий и электромагнитных цепей. Все эти работы отличаются высоким научно-техническим уровнем и рассматриваются обязательно применительно к практическим вопросам.

Особое место в жизни Валентина Ивановича занимала его научная деятельность в рамках Академии наук. В 1932 г. при Академии наук СССР, как известно, была учреждена постоянная комиссия по автоматизации, сокращенно называемая КТА. Сначала эта комиссия, возглавляемая академиком АН СССР А. А. Чернышевым, имела целью «всестороннее изучение нынешнего состояния автоматизации во всех отраслях труда и проектировки практических мероприятий, способствующих надлежащему применению автоматизации при построении социализма в СССР, а также для освещения возможных результатов полного развития автоматизации во всех отраслях труда». ...*Вся работа КТА была недостаточно конкретизирована. Это касалось и направления журнала «Автоматика и телемеханика», первый номер которого был опубликован 13 апреля 1936 г. Журнал явился не только органом КТА Отделения технических наук АН СССР, но почти весь состав КТА входил в редакционную коллегию журнала. Редакционная коллегия журнала ставила перед собою задачи освещения теоретических и основных практических вопросов автоматизации, телемеханики и диспетчеризации во всех отраслях народного хозяйства. Само собой разумеется, что все эти вопросы было чрезвычайно трудно охватить и руководить их развитием становилось все сложнее. Это сказалось и на*



Рис. 3

журнале, его содержании и руководстве. Уже в 1937 г. академик А. Ф. Шорин (ошибка: А. Ф. Шорин не был академиком – Л. З.) сменяет А. А. Чернышева (академик АН СССР – Л. З.), а в начале 1939 г. ответственным редактором журнала Академии наук назначается В. И. Коваленков при членах редколлегии А. А. Чернышеве, В. Ф. Миткевиче и др. Назначение Валентина Ивановича рассматривалось, естественно, как усиление состава редколлегии. О том, насколько эффективна была деятельность В. И. Коваленкова, можно судить хотя бы по тому, что он оставался на этом посту до 1954 г., а в 1940 г. был назначен заместителем директора Института автоматики и телемеханики Академии наук по научной работе. Более того, Валентин Иванович в 1942 г. назначается директором этого же института (рис. 3 – В. И. Коваленков 1940-е гг.).

Вместе с развитием техники связи и формированием вполне определенного направления автоматизации промышленных процессов, к которым, по существу, Валентин Иванович имел косвенное отношение, он организует новое научное учреждение Академии наук, которое поначалу называется скромно – Лабораторией АН СССР по разработке научных проблем проводной связи. В. И. Коваленков руководит этой лабораторией с 1943 г. до последних дней жизни. Здесь Валентин Иванович организует научный семинар по проблемам проводной связи, объединяя вокруг лаборатории крупнейших ученых и инженеров всех специальных научных учреждений, занимающихся развитием проводной связи. К работе лаборатории активно привлекаются научные сотрудники Центрального научно-исследовательского института связи, профессора Московского института инженеров связи, научные организации, исследовательские лаборатории и конструкторские бюро ряда министерств. Валентин Иванович становится общепризнанным руководителем научных работ по проводной связи всего Советского Союза.

Научная деятельность и работа В. И. Коваленкова по прикладным вопросам проводной связи и смежным научно-прикладным проблемам не может быть полностью охарактеризована без того, чтобы не напомнить, хотя бы коротко, несколько важнейших учреждений, которым он отдавал всю свою кипучую энергию. В первую очередь это относится и к организованной Валентином Ивановичем еще в 1924 г. в Ленинграде Экспериментальной электротехнической лаборатории ВСНХ. Эта лаборатория вошла в историю отечественной науки и техники под названием ЛЭЭЛ ВСНХ. Это было самостоятельное научное учреждение, руководимое В. И. Коваленковым. Лаборатория имела своей задачей всестороннее содействие развитию электропромышленности и всех видов проводной и беспроводной связи в СССР. В составе лаборатории было три основных отдела: слабых токов (электросвязи), токов высокой частоты (радиосвязи) и сильных токов (энергетики). В лаборатории был создан весьма сильный коллектив научных работников. В ней были разработаны многие важнейшие проблемы во всех отделах. В конце 1923 г. лаборатория была реорганизована. На базе отдела слабых токов был организован научно-исследовательский институт, называвшийся тогда Центральной лабораторией проводной связи (ЦЛПС). Разумеется, что в многогранной деятельности всех смежных институтов и ЦЛПС Валентин Иванович принимал деятельное участие (*организатором и директором ЦЛПС был А. Ф. Шорин – Л. З.*).

Наряду с изобретательской и научно-исследовательской работой и работами прикладного значения в жизни Валентина Ивановича огромное значение имела педагогическая деятельность. Будучи оставленным на педагогической работе в 1911 г. в Петербургском электротехническом институте, он продолжает в нем непрерывно работать до 1939 г. Здесь, начиная с 1916 г., Валентин Иванович заведует кафедрой телефонии. Одновременно с 1923 по 1944 гг. он является профессором и заведующим кафедрой Академии связи в Ленинграде, ведет преподавание и руководит аспирантами и докторантами в ряде других учебных заведений и в системе Академии наук СССР. Весьма представительным выглядит список учебных курсов лекций, которые читал Валентин Иванович. Сюда входят почти все основные дисциплины в области проводной электросвязи, акустика, теория электромагнитных и электрических цепей, целый ряд факультативных курсов и семинаров. Отличительной особенностью всех лекций Валентина Ивановича была тщательность подобранного и излагаемого им материала лекций, освещение всех новинок той области науки и техники, к которой относились лекции, исключительное внимание к слушателям и широкое общение со слушателями даже по окончании лекций. Не было случая, чтобы Валентин Иванович опоздал на лекции, не был бы подготовлен. Все лекции исключительно

подробно иллюстрировались расчетами материалов и примерами, во всех лекциях строго выдерживалась преемственность всего материала курса, они обязательно сопровождалась личными исследованиями В. И. Коваленкова как практического, так и теоретического характера.

С точки зрения методики изложения материала Валентин Иванович придерживался, хотя об этом и не заявлял, известного принципа академика А. Н. Крылова, который утверждал, что лучше израсходовать лишний кусок мела, чем потом расходовать мозговую энергию на расшифровку того, что коротко записано. Это в равной мере касается записи дифференциальных уравнений, методов их решения и логической последовательности излагаемого материала.

Описывая коротко жизнь и деятельность В. И. Коваленкова, нельзя не отметить его исключительную доброжелательность к людям и чувство коллективности в работе и общественной деятельности. Трудно подробно перечислить все его многочисленные общественные обязанности, включая членство в научных обществах, в руководящих органах таких обществ, как Русское техническое общество, Научно-техническое общество радиотехники и электросвязи им. А. С. Попова, руководство научными организациями студентов, огромное число редакционных коллегий журналов, членство в различных других общественных организациях, комитетах и комиссиях.

Интенсивная общественно полезная, научно-исследовательская и педагогическая деятельность Валентина Ивановича была высоко оценена правительством. В 1934 г. ему было присвоено звание заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, в 1939 г. его избрали членом-корреспондентом Академии наук СССР, в 1941 г. за труд «Теория передачи по линиям электросвязи» была присуждена Государственная премия. В 1943 г. Валентину Ивановичу было присвоено воинское звание генерал-майора инженерных войск. Он был почетным членом Научно-технического общества радиотехники и электросвязи им. А. С. Попова, является лауреатом золотой медали им. А. С. Попова (*ошибка: В. И. Коваленков получил премию им. А. С. Попова в 1916 г., а лауреатом золотой медали им. А. С. Попова не был – Л. З.*). За выдающиеся заслуги перед Родиной В. И. Коваленков награжден двумя орденами Ленина, орденом Трудового Красного Знамени, орденом Красной Звезды и многими медалями и почетными грамотами.

Своим неутомимым трудом и чутким отношением к людям Валентин Ивановичнискал заслуженное уважение и любовь учеников, сотрудников и широких кругов работников электросвязи. Его имя будет продолжать будоражить память советских людей!³

V. U. Roginskiy

A SHORT ESSAY OF VALENTIN IVANOVICH KOVALENKOV'S SCIENTIFIC, PEDAGOGICAL AND SOCIAL ACTIVITY

The paper provides the main facts of V. I. Kovalenkov's life who was a student and a graduate of the ETI (1909), A. S. Popov's associate and the A. S. Popov award laureate (1916). He was professor of LETI, a great scientist, a specialist in the field of wire telegraphy, automatics and telemechanics, a corresponding member of the USSR Academy of Science. Of special interest are V. I. Kovalenkov's memories devoted to creating the first in the world telephone translation via the electron lamp. A copy of V. U. Roginsky's paper, the LETI graduate and lecturer, has been kept for a long time in print in the LETI history museum fund.

Telephone transmission/telephone relay service, sound film cinema/talking pictures, acoustics, mechanical sound recording, television, the laboratory of Academy of Sciences of USSR

³ Статья написана в 1984 г. к 100-летию В. И. Коваленкова (фонд Музея истории «ЛЭТИ»). Инв. № Д-770), печатается с сокращениями, подготовлена к печати канд. техн. наук Л. И. Золотинкиной.

Сведения об авторах

Абрамкин Сергей Евгеньевич

Аспирант кафедры автоматики и процессов управления СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (921) 776-71-24. E-mail: abrsergey@yandex.ru.

Агафонова Дарина Сергеевна

Аспирантка кафедры квантовой электроники и оптоэлектронных приборов СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (905) 217-52-87. E-mail: william_mccsiebe@mail.ru.

Амрия Амр

Аспирант кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры СПбГЭТУ.

Тел.: (812) 234-16-97. E-mail: amr.hamid@gmail.com.

Бегун Петр Иосифович

Зам. зав. кафедрой прикладной механики и инженерной графики СПбГЭТУ, профессор, д-р техн. наук.

Тел.: (812) 558-22-46. E-mail: begun@fromru.com.

Боронахин Александр Михайлович

Доцент кафедры лазерных измерительных и навигационных систем СПбГЭТУ, канд. техн. наук.

Тел.: +7 (921) 924-33-83. E-mail: boronachin@mail.ru.

Волчек Андрей Олегович

Главный конструктор ОАО «НПО «Прибор»».

E-mail: volchek@npo-pribor.ru.

Гайворонский Дмитрий Вячеславович

Доцент кафедры радиотехнических систем СПбГЭТУ, канд. техн. наук.

Тел.: +7 (921) 924-23-13. E-mail: dvgaivoronschi@rambler.ru.

Голубев Иван Алексеевич

Аспирант кафедры вычислительной техники СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (905) 210-07-80. E-mail: iagolubev@mail.eltech.ru.

Гончаров Вадим Дмитриевич

Профессор кафедры теоретических основ электротехники СПбГЭТУ, д-р техн. наук, доцент.

E-mail: VDGoncharov@rambler.ru.

Грачева Ирина Евгеньевна

Доцент кафедры микроэлектроники СПбГЭТУ, канд. физ.-мат. наук.

Тел.: (812) 234-30-16. E-mail: IEGrachova@mail.ru.

Друян Евгений Васильевич

Ассистент кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ.

Тел.: (812) 234-68-18. E-mail: druian@yandex.ru.

Душин Сергей Евгеньевич

Профессор кафедры автоматики и процессов управления СПбГЭТУ, д-р техн. наук,
доцент.

Тел.: +7 (921) 970-46-31. E-mail: dushins@yandex.ru.

Землякова Светлана Юрьевна

Аспирантка кафедры микроэлектроники СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (952) 227-77-25. E-mail: swetka_sem@mail.ru.

Иванов Аркадий Анатольевич

Доцент кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры СПбГЭТУ,
канд. техн. наук.

Тел.: (812) 972-10-36. E-mail: aai2@yandex.ru.

Имаев Дамир Хабибович

Профессор кафедры автоматики и процессов управления СПбГЭТУ, д-р техн. наук.

Тел.: +7 (921) 584-64-45. E-mail: damir.imaev@mail.ru.

Калинина Валентина Васильевна

Ассистент кафедры философии СПбГЭТУ, канд. филос. наук.

Тел.: (812) 346-47-83. E-mail: valentkalinina@mail.ru.

Каршиев Зайнидин Абдувалиевич

Аспирант кафедры вычислительной техники СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (965) 069-36-61. E-mail: zaynidin85@mail.ru.

Кирьянчиков Владимир Андреевич

Доцент кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ СПбГЭТУ, канд.
техн. наук.

Тел.: +7 (911) 280-80-00. E-mail: vak@nicetu.spb.ru.

Кочелаев Евгений Александрович

Инженер II категории ОАО «НПО “Прибор”», аспирант (заочная форма обучения)
кафедры инженерной защиты окружающей среды СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (960) 239-35-51. E-mail: kochelaev@bk.ru.

Левицкий Владимир Сергеевич

Студент кафедры микроэлектроники СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (911) 146-60-45. E-mail: lev-vladimir@yandex.ru.

Лысенко Андрей Александрович

Инженер-программист ООО «ЭРЕМЕКС»; соискатель степени канд. техн. наук при
кафедре систем автоматизированного проектирования СПбГЭТУ.

Тел.: (812) 448-04-44/5484. E-mail: lysenko@spb.prosoft.ru.

Лячек Юлий Теодосович

Профессор кафедры систем автоматизированного проектирования СПбГЭТУ, канд.
техн. наук, доцент. Почетный работник высшего профессионального образования РФ.

Тел.: +7 (905) 256-30-93. E-mail: ytlyachek@mail.ru.

Максимов Александр Иванович

Доцент кафедры микроэлектроники СПбГЭТУ, канд. физ.-мат. наук.

Тел.: +7 (952) 236-86-60. E-mail: aimaximov@mail.ru.

Мамина Раиса Ильинична

Профессор кафедры философии СПбГЭТУ, канд. филос. наук.

Тел.: (812) 346-47-83.

Мошников Вячеслав Алексеевич

Профессор кафедры микроэлектроники СПбГЭТУ, д-р физ.-мат. наук.

Тел.: (812) 234-30-16. E-mail: VAMoshnikov@mail.ru.

Пирайнен Евгения Викторовна

Доцент кафедры философии СПбГЭТУ, канд. филос. наук.

Тел.: (812) 346-47-83.

Полубасов Олег Борисович

Начальник сектора ООО «ЭРЕМЕКС»; канд. техн. наук.

Тел.: (812) 448-04-44/5484. E-mail: polubasov@spb.prosoft.ru.

Поляшова Клавдия Александровна

Инженер кафедры автоматизации и процессов управления СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (911) 835-72-78. E-mail: ava@bk.ru.

Пошехонов Леонид Борисович

Доцент кафедры автоматизации и процессов управления СПбГЭТУ, канд. техн. наук.

Тел.: +7 (921) 349-23-12. E-mail: plb2312@mail.ru.

Путов Антон Викторович

Ассистент кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ.

Тел.: (812) 234-68-18. E-mail: anputov@yandex.ru.

Путов Виктор Владимирович

Зав. кафедрой систем автоматического управления СПбГЭТУ, декан ФЭА, профессор, д-р техн. наук.

Тел.: (812) 234-68-18. E-mail: vvputov@mail.ru.

Рогинский Владимир Юрьевич [1911–1992].

Специалист в области разработки радиоэлектронной аппаратуры. Канд. техн. наук (1941), доцент (ЛЭТИ, ЛИАП). Зам. руководителя секции «История развития радиотехники, электроники и связи» (1970–1980).

Романов Аркадий Сергеевич

Аспирант кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ СПбГЭТУ, магистр.

Тел.: +7 (952) 390-49-99. E-mail: arkadyrom@gmail.com.

Рубашова Дарья Александровна

Аспирантка кафедры прикладной механики и инженерной графики СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (911) 978-04-48. E-mail: rubashovad@bk.ru.

Самсонов Дмитрий Сергеевич

Ассистент кафедры электротехнологий и преобразовательной техники СПбГЭТУ.

E-mail: dmitry_samsonov@mail.ru.

Сидоренко Владимир Михайлович

Зав. кафедрой инженерной защиты окружающей среды СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (911) 771-82-55. E-mail: vmsidorenko@mail.ru.

Степанов Андрей Борисович

Аспирант кафедры цифровой обработки сигналов СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.

Тел.: +7 (921) 362-54-52. E-mail: sabiko@yandex.ru.

Степанов Борис Георгиевич

Доцент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ.

Тел.: (812) 234-37-26. E-mail: BGStepanov@mail.eltech.ru.

Суров Илья Леонидович

Аспирант кафедры лазерных измерительных и навигационных систем СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (911) 266-44-89. E-mail: ilsurov@gmail.com.

Теплякова Александра Викторовна

Инженер кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ.

Тел.: (812) 234-37-26. E-mail: smaest@mail.ru.

Фискин Евгений Михайлович

Доцент Иркутского технического университета, канд. техн. наук.

E-mail: fmm1@rambler.ru.

Холод Иван Иванович

Доцент кафедры вычислительной техники СПбГЭТУ, канд. техн. наук.

Тел.: +7 (921) 795-42-58. E-mail: iiholod@mail.ru.

Шевцов Игорь Владимирович

Аспирант кафедры автоматике и процессов управления СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (909) 564-72-15. E-mail: ShevtsovIV@KolaGMK.ru.

Шелудько Виктор Николаевич

Первый проректор СПбГЭТУ, канд. техн. наук, профессор.

Тел.: (812) 234-25-39. E-mail: NSheludko@eltech.ru.

Шестопалов Михаил Юрьевич

Проректор по научной работе СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (921) 946-01-18. E-mail: shestopalov_08@mail.ru.

Щетилина Олеся Валерьевна

Аспирантка кафедры прикладной механики и инженерной графики СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (952) 210-68-44. E-mail: disjunctio@gmail.com.

Правила представления рукописей авторами

В редакционный совет журнала «Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»» необходимо представить:

- файлы на дискете либо CD (в отдельных случаях по предварительному согласованию с редсоветом допустима передача материалов по электронной почте):
 - рукопись статьи;
 - сведения об авторе(ах);
- документы на листах формата А4 (1 экз.):
 - рукопись статьи (статья должна быть объемом 4–8 маш. с., обзорная статья – до 16 маш. с.);
 - сведения об авторе(ах);
 - рекомендация кафедры с указанием наименования тематического раздела, в котором предполагается опубликование материала;
 - экспертное заключение о возможности опубликования материала в открытой печати;
 - сопроводительное письмо (только для авторов, не работающих (не обучающихся) в СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).

Сведения об авторах должны содержать:

1. Фамилию, имя, отчество (полностью) автора.
2. Основное место работы.
3. Должность.
4. Ученую степень, ученое звание.
5. Контактный телефон, адрес электронной почты.

Все сведения печатаются в строку (без пунктов) на русском и английском языках.

Правила оформления текста статьи

Статья должна быть тщательно отредактирована, содержать признаки научной публикации:

- текстовый редактор Microsoft Word версии не ниже 97;
- формат бумаги А4;
- параметры страницы: поля – верхнее 2.5 см, левое и нижнее 2.5 см, правое 2 см, верхний колонтитул 2 см, нижний колонтитул 2 см;
- основной текст статьи: шрифт «Times New Roman» 12 pt; выравнивание по ширине; первая строка с абзацным отступом 1 см; межстрочный интервал «Множитель 1.2».

На первой странице указывается индекс УДК (в левом верхнем углу; шрифт «Times New Roman» 14 pt; межстрочный интервал одинарный); далее даются инициалы и фамилии авторов, затем название статьи, аннотация статьи и ключевые слова на русском языке. Инициалы и фамилии авторов, название статьи, аннотация статьи и ключевые слова на английском языке размещаются в конце публикации после библиографического списка.

Перечень авторов разделен запятыми, инициалы перед фамилиями (шрифт «Times New Roman» 12 pt, жирный курсив; выравнивание по правому краю, абзацный отступ справа 1 см; автоматические переносы отключены; интервалы перед абзацем и после него 6 pt, межстрочный интервал одинарный).

Название статьи набирается прописными буквами (шрифт «Times New Roman» 14 pt; жирный; выравнивание по левому краю; отступы слева и справа 1 см; автоматические переносы отключены; интервалы перед абзацем 6 pt, после него – 12 pt; межстрочный интервал одинарный).

Аннотация содержит 3–7 строк, характеризующих содержание статьи (шрифт «Times New Roman» 10 pt, курсив; выравнивание по ширине; отступы: слева и справа 1.5 см, первая строка 0.75 см; интервалы перед абзацем и после него 0 pt, межстрочный интервал одинарный).

Ключевые слова состоят из 3–10 слов и словосочетаний, отражающих содержание статьи, разделенных запятыми, в конце их перечисления точка не ставится; шрифт «Times New Roman» 10 pt, жирный; выравнивание по левому краю; автоматические переносы отключены; интервалы перед абзацем 6 pt, после него 9 pt; межстрочный интервал одинарный).

Далее следует текст статьи.

После основного текста следует библиографический список, который включает:

➤ *заголовок* «Список литературы» набирается прописными буквами (шрифт «Times New Roman» 12 pt; выравнивание по центру; интервалы: перед абзацем 6 pt, после него 6 pt; межстрочный интервал «Одинарный»);

➤ *библиографическое описание источника* с порядковым номером ссылки на него по тексту, начиная с первого, выполненное по ГОСТ 7.3–2003. Библиографическое описание документа. Введ. 01.07.2004 / Госкомстандарт. М., 2004 (отдельным абзацем; шрифт «Times New Roman» 10 pt; первая строка с абзацным отступом 0.7 см; выравнивание по ширине; межстрочный интервал одинарный).

Библиографический список не должен превышать 10 (для обзорных заказных статей – 20) наименований: приводятся только источники, на которые есть ссылки в тексте (ссылки на неопубликованные и нетиражированные работы не допускаются).

Для создания *формул* используются встроенные возможности Word и (или) редактора MathType. Необходимо использовать следующие установки редактора формул. Размеры: «полный» 12 pt, «подстрочный» 10 pt, «под-подстрочный» 8 pt, «символ» 14 pt, «подсимвол» 12 pt; стили: текст, функция, число – шрифт «Times New Roman», вектор-матрица – шрифт «Times New Roman», жирный; греческий малый, греческий большой, символ – шрифт «Symbol», прямой; переменная – шрифт «Times New Roman», курсив; интервалы: перед формулой 6 pt, после нее 6 pt.

На каждый рисунок и таблицу в тексте статьи необходимо дать ссылку. Каждый рисунок и таблица должны быть пронумерованы (напр.: Рис. 1, Табл. 3).

Текст в *таблицах* печатается через 1 интервал, шрифт «Times New Roman»; основной текст 10 pt, индексы 8 pt. Нумерационный заголовок содержит слово «Таблица» и ее номер арабскими цифрами (без знака номера перед ними и без точки на конце); выравнивается по правому краю таблицы и выделяется светлым курсивом; интервалы: перед таблице 4 pt, после нее 4 pt.

Рисунки цифрового формата (в электронном виде) создаются средствами Word или другими программами в черно-белом виде. Цветные рисунки не допускаются. Рисунки не редактируются. Основные линии на рисунках (границы блоков и соединительные линии на схемах, линии графиков) имеют толщину 1.25 pt, вспомогательные (линии-выноски, оси, размерные линии) – 0.75 pt.

Описание содержания рисунка, а также введенных на нем обозначений следует приводить в основном тексте статьи. Подпись под рисунком содержит только его номер (шрифт «Times New Roman», курсив, 10 pt) и располагается по центру рисунка. Все тексты и

обозначения на рисунке даются шрифтом размером 10 pt, индексы 8 pt с единичным межстрочным интервалом; цифровые обозначения на линиях выносок и номер рисунка даются курсивом. Буквенные обозначения фрагментов рисунка (шрифт «Times New Roman», курсив, 10 pt) ставятся внизу фрагмента; интервалы: перед рисунком 6 pt, после него 6 pt.

При невозможности представить электронные версии рисунков следует представить только твердые копии, обеспечивающие качественное воспроизведение рисунков после их сканирования (графики – черной тушью на белой бумаге, фотографии – на матовой бумаге размером не менее 9 × 12 см, не более 21 × 30 см).

Перечень основных тематических направлений журнала:

- Радиоэлектроника и телекоммуникации.
- Физика твердого тела и электроника.
- Информатика, управление и компьютерные технологии.
- Автоматизация и управление.
- Электротехника.
- Приборостроение и информационные технологии.
- Биотехнические системы в медицине и экологии.
- Управление качеством, инновационный и антикризисный менеджмент.
- Гуманитарные науки.
- История науки, образования и техники.
- Современные технологии в образовании.

Рукописи аспирантов печатаются бесплатно.

Технические вопросы можно выяснить по адресу: Izvestiya-leti@yandex.ru