

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

УДК 538.9

ДИСКРЕТНЫЕ ВОЛНЫ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ И ДИССИПАТИВНЫЕ СОЛИТОНЫ В КОГЕРЕНТНО ВОЗБУЖДАЕМЫХ НАНОСТРУКТУРАХ И МЕТАМАТЕРИАЛАХ

Н.Н. Розанов, Н.В. Высотина, А.Н. Шацев, А.С. Десятников,
И.В. Шадривов, Р.Е. Носков, Ю.С. Кившарь



Розанов Николай Николаевич, член-корреспондент Российской академии наук, доктор физико-математических наук, профессор, начальник отдела ФГУП «НПК «ГОИ им. С.И. Вавилова», заведующий кафедрой Оптики лазеров СПбНИУ ИТМО. Лауреат премии им. Д.С. Рождественского РАН (2007). Область научных интересов – физическая и нелинейная оптика, лазерная физика, физика солитонов.



Высотина Нина Вениаминовна, научный сотрудник ФГУП «НПК «ГОИ им. С.И. Вавилова». Область научных интересов – вычислительная математика, численное моделирование.



Шацев Анатолий Натанович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГУП «НПК «ГОИ им. С.И. Вавилова». Область научных интересов – нелинейная оптика, лазерная физика, физика солитонов.



Десятников Антон Сергеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Австралийского национального университета.



Шадривов Илья Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Австралийского национального университета, стипендиат Королевы Елизаветы II.



Носков Роман Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Область научных интересов – оптика наноструктурированных композитных сред на основе металлических наночастиц, левые среды, электромагнитная невидимость.



Кившарь Юрий Семенович, академик Австралийской академии наук, профессор, руководитель отдела, ведущий ученый, научный руководитель лаборатории Австралийского национального университета, обладатель мегагранта Министерства образования и науки Российской Федерации.

Проведен сравнительный анализ локализованных структур – волн переключения и диссипативных солитонов – в трех дискретных нелинейных системах, резонансно возбуждаемых когерентным поддерживающим излучением: цепочке молекул, цепочке металлических наночастиц и решетке разомкнутых кольцевых резонаторов.

Ключевые слова: диссипативные солитоны, дискретные солитоны, волны переключения.

Введение

Диссипативные солитоны, представляющие локализованные за счет баланса притока и оттока энергии структуры волн, к настоящему времени более полно изучены в таких широкоапертурных оптических системах, как нелинейные интерферометры с когерентным поддерживающим излучением и лазеры с насыщающимся поглощением [1]. В этих континуальных системах продемонстрированы одномер-

ные и двумерные пространственные солитоны и предложены их приложения для обработки информации. Однако размеры этих солитонов составляют не менее 10 мкм, что не делает такие системы конкурентно-способными по сравнению с традиционной электроникой. Кроме того, в подобных системах сложно формировать трехмерные, в особенности топологические солитоны.

Указанные ограничения могут быть преодолены при использовании периодических наноструктур и метаматериалов, которые представляют собой набор слабо связанных нелинейных элементов, возбуждаемых внешним когерентным излучением [2–4] (рис. 1). В этой статье мы рассмотрим три родственные системы, в которых могут быть сформированы дискретные диссипативные структуры.

Модель 1 – это цепочка молекул с трехуровневой схемой электронных переходов. Внешнее излучение резонансно возбуждает молекулы, под его действием молекулы излучают, подобно диполям, и это излучение частично перехватывается соседними молекулами (диполь-дипольное взаимодействие молекул). К настоящему времени в расчетах продемонстрированы солитоны с размерами в несколько нанометров и возможность управлять их положением в цепочке и движением с помощью наклонного падения внешнего излучения [1, 5]. Перспективны для реализации таких систем J -агрегаты цианиновых красителей, обладающие коллективным (экситонным) механизмом их резонансного возбуждения лазерным излучением. В то же время еще предстоит разработка более полной теории этих принципиально квантовых объектов с выходом за рамки одночастичного приближения и учетом межмолекулярных корреляций.

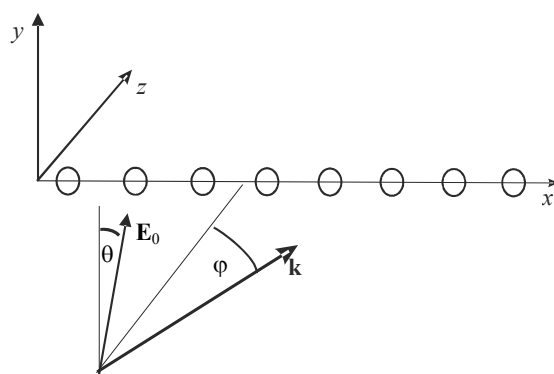


Рис. 1. Одномерная дискретная система. Цепочка нелинейных элементов, изображенных кружками, расположена вдоль оси x . $\mathbf{E}_0$ – вектор напряженности электрического поля поддерживающего излучения; волновой вектор $\mathbf{k}$ падающей волны лежит в плоскости xz ; φ – угол между волновым вектором $\mathbf{k}$ и осью z ; θ – угол поворота вектора поляризации поля относительно оси y

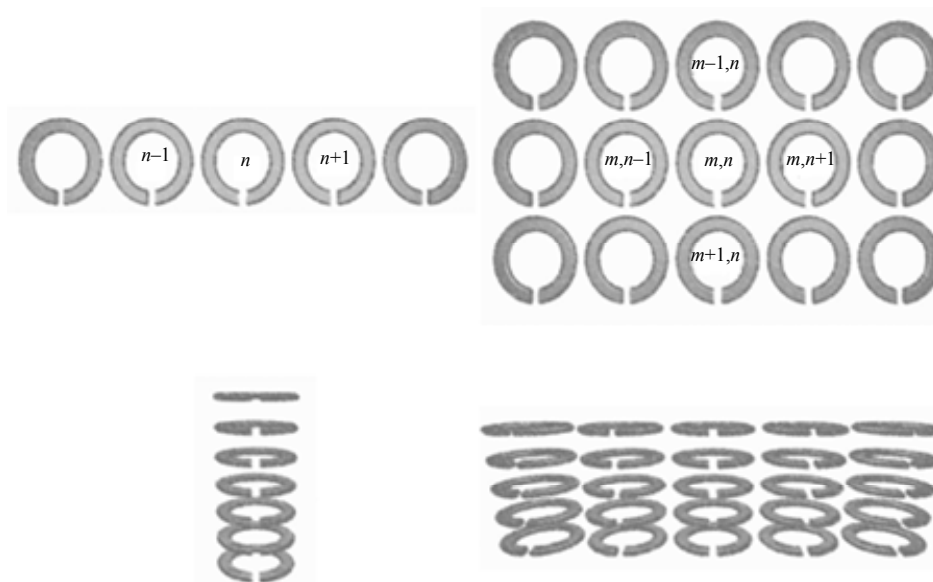


Рис. 2. Цепочки (слева) и двумерные решетки (справа) разомкнутых кольцевых резонаторов с различной ориентацией

Модель 2 близка к предыдущей, но в ней молекулы заменяются металлическими наночастицами, погруженными в диэлектрик [6, 7]. В отличие от молекулярных J -агрегатов с фиксированным направлением дипольного момента, наночастицы обладают изотропным откликом, так что здесь добавляется поляризационная степень свободы, и солитоны становятся в общем случае векторными. К настоящему времени в литературе для моделей 1 и 2 изучены только одномерные системы, и рассмотрение хотя бы двумерных

схем представляет важную задачу дальнейших исследований. В то же время в модели 3 – цепочке или решетке возбуждаемых когерентным излучением разомкнутых кольцевых резонаторов (рис. 2) с нелинейными элементами, помещенными в разъемы [8–16] – возможна реализация дискретных диссипативных солитонов любой геометрической размерности. В моделях 1 и 2 аналогичен вид связи элементов (диполь-дипольное взаимодействие), но различается вид нелинейности. Последний совпадает (кубическая нелинейность) для моделей 2 и 3. Ниже мы проанализируем общие и специфические свойства солитонов в трех указанных моделях, уделяя большее внимание менее изученным в литературе вариантам – модели 2 для одномерной геометрии и модели 3 для двумерной и трехмерной геометрии.

Управляющие уравнения

Модель 1. J-агрегат моделируется линейной цепочкой N трехуровневых молекул, взаимодействующих между собой через электромагнитное поле. Два нижних уровня формируют оптический переход, частота которого близка к лазерной частоте. Третий молекулярный уровень служит для описания аннигиляции двух возбуждений на соседних молекулах: одно из возбуждений дезактивируется, а другое переходит на третий уровень с последующей релаксацией либо обратно на второй, либо на первый уровень. В результате соответственно либо одно, либо оба возбуждения исчезают из системы. Частота перехода из основного состояния (1) в третье (3) предполагается приблизительно равной удвоенной частоте перехода $1 \rightarrow 2$. Расстояние между молекулами d много меньше длины волны излучения. Частота лазерного излучения ω_0 , поляризация излучения линейная.

В подходе одночастичной матрицы плотности управляющие уравнения для элементов матрицы плотности ρ_{ik} , $i, k = 1, 2, \dots, N$, в приближении медленно меняющихся амплитуд имеют вид (см. [1, 5] и приведенные там ссылки)

$$\begin{aligned}\dot{\rho}_{11}^{(k)} &= \frac{1}{4} \sum_{l=1}^N (\gamma_{lk} + i\Delta_{lk}) R_l R_k^* - i \frac{\Omega}{4} R_k^* + c.c. + \alpha_s \rho_{22}^{(k)} [\rho_{22}^{(k-1)} + \rho_{22}^{(k+1)}] + \Gamma_{31} \rho_{33}^{(k)} + \Gamma_{21} \rho_{22}^{(k)} + \Gamma_{11} \rho_{22}^{(k)}, \\ \dot{\rho}_{22}^{(k)} &= -\frac{1}{4} \sum_{l=1}^N (\gamma_{lk} + i\Delta_{lk}) R_l R_k^* + i \frac{\Omega}{4} R_k^* + c.c. - 2\alpha_s \rho_{22}^{(k)} [\rho_{22}^{(k-1)} + \rho_{22}^{(k+1)}] + \Gamma_{32} \rho_{33}^{(k)} - \Gamma_{21} \rho_{22}^{(k)} - \Gamma_{11} \rho_{22}^{(k)}, \\ \dot{\rho}_{33}^{(k)} &= \alpha_s \rho_{22}^{(k)} [\rho_{22}^{(k-1)} + \rho_{22}^{(k+1)}] - (\Gamma_{31} + \Gamma_{32}) \rho_{33}^{(k)}, \\ \dot{R}_k &= -(\Gamma_{\perp} + i\Delta_0) R_k + \sum_{l=1}^N (\gamma_{lk} + i\Delta_{lk}) R_l [\rho_{22}^{(k)} - \rho_{11}^{(k)}] - i\Omega [\rho_{22}^{(k)} - \rho_{11}^{(k)}] + \alpha_s R_k [\rho_{22}^{(k-1)} + \rho_{22}^{(k+1)}].\end{aligned}$$

Точка в левых частях уравнений означает временную производную; $c.c.$ – знак комплексного сопряжения; Δ_0 – значение частотной расстройки для молекул в цепочке; $R_k = 2\rho_{21}^{(k)} \exp(i\omega_0 t)$. Матрицы γ_{lk} и Δ_{lk} ($l \neq k$) описывают запаздывающее диполь-дипольное взаимодействие молекул в агрегате:

$$\begin{aligned}\gamma_{lk} &= \frac{\mu^2}{\hbar d^3} \left\{ \left[k_0 d \frac{\cos(k_0 d |l-k|)}{|l-k|^2} - \frac{\sin(k_0 d |l-k|)}{|l-k|^3} \right] \times (1 - 3 \cos^2 \theta) + (k_0 d)^2 \frac{\sin(k_0 d |l-k|)}{|l-k|} \sin^2 \theta \right\}, \quad l \neq k, \\ \Delta_{lk} &= \frac{\mu^2}{\hbar d^3} \left\{ \left[\frac{\cos(k_0 d |l-k|)}{|l-k|^3} + k_0 d \frac{\sin(k_0 d |l-k|)}{|l-k|^2} \right] \times (1 - 3 \cos^2 \theta) - (k_0 d)^2 \frac{\cos(k_0 d |l-k|)}{|l-k|} \sin^2 \theta \right\}, \quad l \neq k, \\ \gamma_{ll} &= 0, \quad \Delta_{ll} = 0.\end{aligned} \quad (1)$$

Волновое число $k_0 = \omega_0/c$, где c – скорость света в вакууме. Величина $\Omega = (\mu/\hbar)E_i$ – частота Раби, пропорциональная комплексной амплитуде поля, так что вещественная напряженность электрического поля в падающей волне

$$\tilde{E} = \text{Re}[E_i(t) \exp(-i\omega_0 t)].$$

Другими параметрами задачи являются матричный элемент дипольного момента перехода μ , угол между дипольным моментом и осью цепочки θ , релаксационные постоянные γ и Γ , параметр экситон-экситонной аннигиляции α_s . Принятый подход оправдан, если уровень возбуждения молекул слабый: $1 - \rho_{11}^{(k)} \ll 1$ (диагональные элементы матрицы плотности пропорциональны населенностям соответствующих уровней).

В линейных агрегатах взаимодействие с излучением молекул у краев цепочки существенно отличается от случая молекул в середине цепочки, главным образом, из-за эффекта двухэкситонной аннигиляции (параметр α_s). В типичных условиях эффекты краев захватывают несколько десятков молекул, поэтому для средней части достаточно длинной цепочки от краевых эффектов можно отвлечься. Чтобы исключить их в расчетах, можно представить, что цепочка замкнута в кольцо (периодические граничные условия). Хотя молекулярные агрегаты с кольцевой геометрией и известны, молекулы в них неодинаково взаимодействуют с излучением с линейной поляризацией (частота Раби пропорциональна косинусу угла

между направлениями дипольного момента молекулы и поляризации излучения). Поэтому для обеспечения одинаковых условий для различных молекул пришлось бы перейти к их взаимодействию с излучением, обладающим, например, круговой поляризацией.

В модели 2 управляющие уравнения имеют вид [6, 7]

$$\begin{aligned} -i \frac{dP_n^\perp}{d\tau} + (-i\gamma + \Omega + |P_n|^2) P_n^\perp + \sum_{m \neq n} G_{n,m}^\perp P_m^\perp &= E_n^\perp, \\ -i \frac{dP_n^\parallel}{d\tau} + (-i\gamma + \Omega + |P_n|^2) P_n^\parallel + \sum_{m \neq n} G_{n,m}^\parallel P_m^\parallel &= E_n^\parallel, \end{aligned} \quad (2)$$

где $|P_n|^2 = |P_n^\perp|^2 + |P_n^\parallel|^2$, верхние индексы указывают составляющие векторов отклика шаров (**P**) и поддерживающего излучения (**E**) по отношению к оси цепочки (рис. 1), параметры γ , Ω , k_0 и d имеют тот же смысл, что и в модели 1, а коэффициенты связи элементов аналогичны (1):

$$\begin{aligned} G_{n,m}^\perp &= \frac{\eta}{2} \left((k_0 d)^2 - \frac{ik_0 d}{|n-m|} - \frac{1}{|n-m|^2} \right) \frac{\exp(-ik_0 d |n-m|)}{|n-m|}, \\ G_{n,m}^\parallel &= \eta \left(\frac{ik_0 d}{|n-m|} + \frac{1}{|n-m|^2} \right) \frac{\exp(-ik_0 d |n-m|)}{|n-m|}. \end{aligned}$$

Параметр η определяется отношением диаметра шаров и шага решетки, а также диэлектрической проницаемостью шаров и матрицы-диэлектрика [6, 7].

Управляющие уравнения для модели 3 формулируются для медленно меняющихся амплитуд электрического тока или намагниченности отдельных резонаторов [8]:

$$i \frac{d\psi_n}{dt} - (2\Omega - i\gamma + \alpha |\psi_n|^2) \psi_n - \Sigma = \kappa C_n.$$

Здесь время t нормировано на период собственных колебаний изолированного резонатора, Ω – отстройка собственной частоты колебаний от частоты когерентного поддерживающего излучения, нормированная на собственную частоту, γ – затухание резонатора с той же нормировкой, $\alpha = \pm 1$ – знак коэффициента керровской нелинейности. Коэффициент κ определяет силу связи ближайших резонаторов, и

$$\begin{aligned} C_n &= 2[\psi(n_x, n_y, n_z - 1) + \psi(n_x, n_y, n_z + 1)] - [\psi(n_x - 1, n_y, n_z) + \psi(n_x + 1, n_y, n_z)] - \\ &\quad - [\psi(n_x, n_y - 1, n_z) + \psi(n_x, n_y + 1, n_z)], \quad \psi_n = \psi(n_x, n_y, n_z). \end{aligned}$$

Целочисленные индексы n_x, n_y, n_z определяют положение резонатора в решетке. Управляющие уравнения для каждой модели дополняются начальными условиями, роль которых особо важна в условиях бистабильности или тристабильности (см. ниже).

Одномерные локализованные структуры (модель 2)

Квазиоднородные распределения. Для идеальной цепочки бесконечной длины с одинаковым стационарным состоянием всех элементов (пространственно-однородные стационарные состояния) из (2) при $P_n = P_0$ и нулевых производных получаем алгебраическое уравнение 5-й степени:

$$\begin{aligned} |P_0|^2 \left\{ \left(|P_0|^2 + \Omega + \operatorname{Re} \sum_{i=1}^{\infty} A_i^\perp \right)^2 + \left(\gamma - \operatorname{Im} \sum_{i=1}^{\infty} A_i^\perp \right)^2 \right\} &\left\{ \left(|P_0|^2 + \Omega + \operatorname{Re} \sum_{i=1}^{\infty} A_i^\parallel \right)^2 + \left(\gamma - \operatorname{Im} \sum_{i=1}^{\infty} A_i^\parallel \right)^2 \right\} = \\ = |E_0|^2 \left[(\cos \theta)^2 \left\{ \left(|P_0|^2 + \Omega + \operatorname{Re} \sum_{i=1}^{\infty} A_i^\parallel \right)^2 + \left(\gamma - \operatorname{Im} \sum_{i=1}^{\infty} A_i^\parallel \right)^2 \right\} + \right. \\ &\left. + (\sin \theta)^2 \left\{ \left(|P_0|^2 + \Omega + \operatorname{Re} \sum_{i=1}^{\infty} A_i^\perp \right)^2 + \left(\gamma - \operatorname{Im} \sum_{i=1}^{\infty} A_i^\perp \right)^2 \right\} \right], \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} A_j^\perp &= \eta (-j^{-3} - ik_0 d j^{-2} + (k_0 d)^2 j^{-1}) \exp(-ik_0 d j), \\ A_j^\parallel &= 2\eta (j^{-3} + ik_0 d j^{-2}) \exp(-ik_0 d j). \end{aligned}$$

При $\theta = 0, \pi/2$ степень полинома снижается до третьей, тогда одному и тому же значению интенсивности поддерживающего излучения могут отвечать три значения отклика. С учетом заведомой неустойчивости промежуточного значения это означает бистабильность (рис. 3, а). Этот вариант характерен

также для скалярных моделей 1 и 3, тогда как тристабильность становится возможной для векторной модели 2 (рис. 3, б).

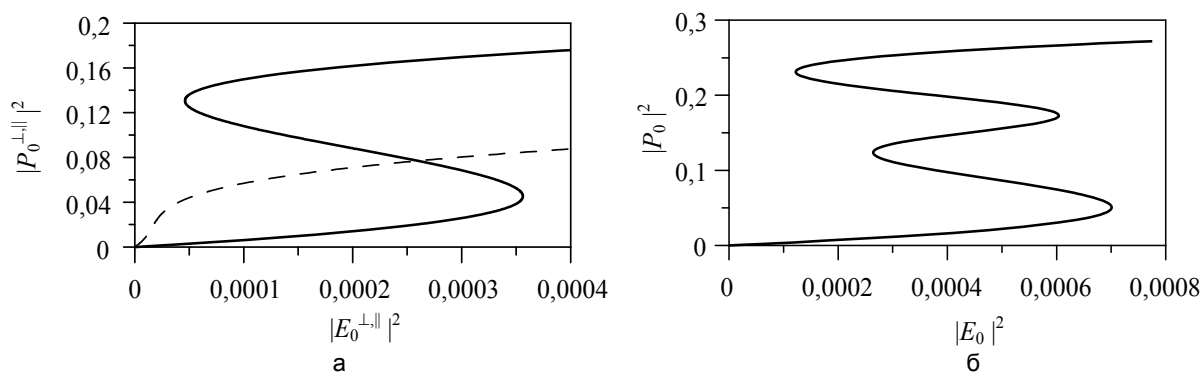


Рис. 3. Зависимость поперечной и продольной поляризации $|P_0^\perp|^2, |P_0^\parallel|^2$ от интенсивности внешнего поля

$I = |E_0^\perp|^2, |E_0^\parallel|^2$ для бесконечной цепочки; перпендикулярная поляризация падающей волны ($\theta = 0$) – сплошная кривая, параллельная поляризация ($\theta = \pi/2$) – пунктирная кривая, $\Omega = -0,1$ (а).

Зависимость $|P_0|^2$ от $|E_0|^2$ при $\Omega = -0,2$, $\theta = 0, 2\pi$ для бесконечной цепочки (б). Устойчивость для конечной цепочки проверялась численно. Верхняя ветвь устойчива целиком, нижняя ветвь устойчива при интенсивностях падающей волны от 0 до $\sim 0,0004$, остальные ветви неустойчивы (расчет при $N = 100$)

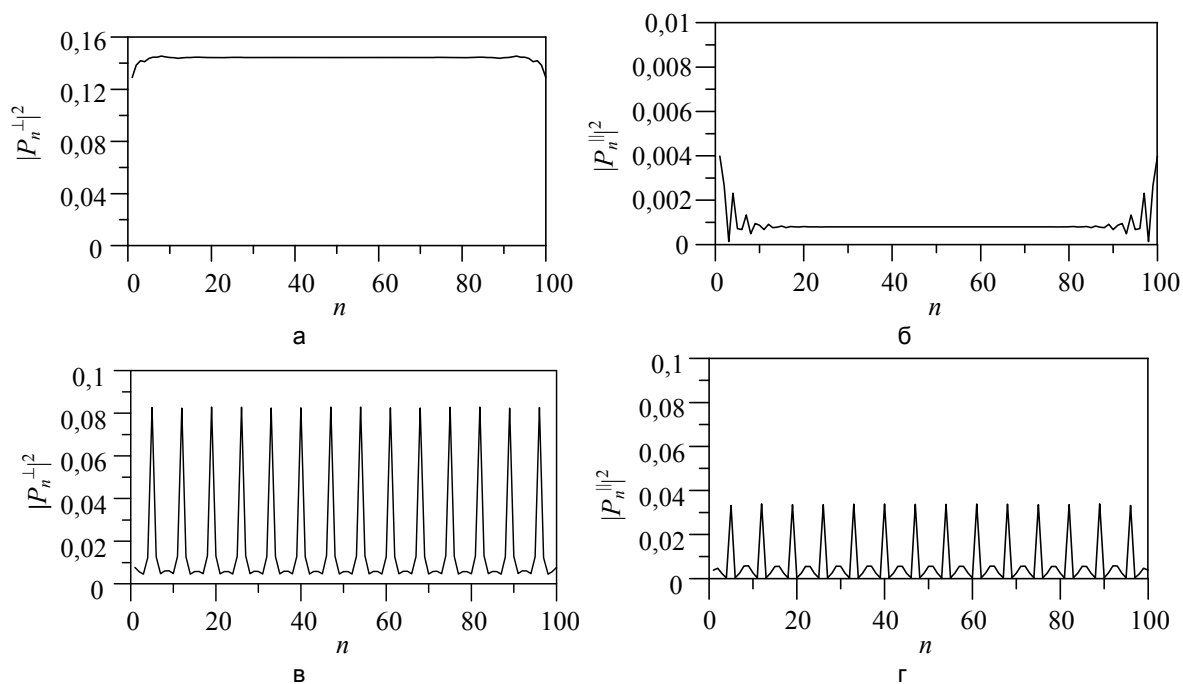


Рис. 4. Интенсивность перпендикулярной (а, в) и параллельной (б, г) составляющих отклика при $|E_0|^2 = 0,000088$ и $\theta = 0,12\pi$. Для (в, г) начальные условия нулевые, для (а, б) ненулевые

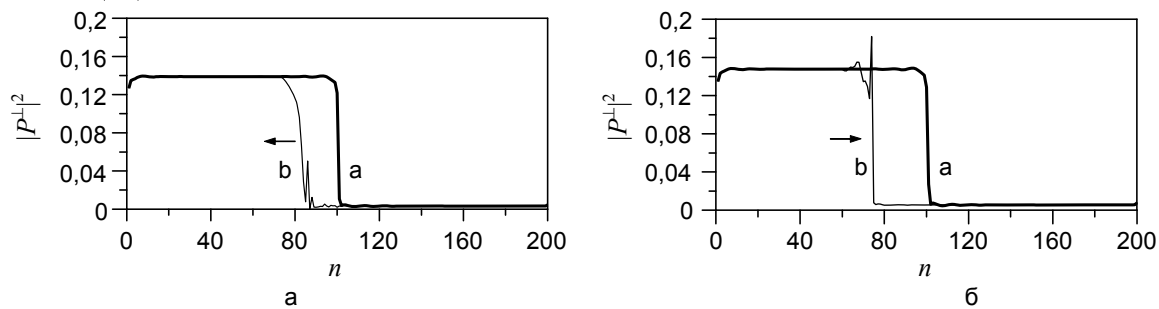


Рис. 5. Профили неподвижной (а) и движущейся (б) волны переключения. $I = 0,55 \times 10^{-4}$, скорость $V < 0$ (область 2 рис. 7) (а); $I = 0,88 \times 10^{-4}$, $V > 0$ (область 5 рис. 7) (б).

Для цепочки конечной длины вследствие краевых эффектов однородные распределения заменяются на неоднородные. При этом следует говорить уже о пространственной бистабильности (бистабильности пространственных структур, устанавливающихся при различных начальных условиях) [1]. Еще одно важное условие реализации режима состоит в требовании его устойчивости относительно малых возмущений. Для бесконечной цепочки линейный анализ устойчивости стационарных однородных распределений выполняется стандартным образом [6, 7], в других случаях обычно необходимы численные расчеты. В результате развития неустойчивости в цепочке формируются и устанавливаются квазипериодические структуры. Интересной особенностью, известной и для континуальных систем [1], является возможность установления при одних и тех же параметрах системы, но при различных начальных условиях, либо квазиоднородной (рис. 4, а, б), либо квазипериодической (рис. 4, в, г) структуры.

Волны переключения в скалярной системе. Как и в континуальных системах, внутри интервала бистабильности квазиоднородных распределений существуют волны переключения (ВП) (другие названия – доменные стенки и кинки). При удалении от фронта волны переключения в одну или другую сторону распределение асимптотически приближается к одному из возможных квазиоднородных распределений, различающихся по разные стороны от фронта. Фронт волны может быть неподвижным (неподвижная волна переключения, рис. 5, кривая а, или движущимся (движущаяся волна переключения, рис. 5, кривая б). Если для континуальных систем скорость волны переключения обращается в нуль при одном («максвелловском») значении интенсивности поддерживающего излучения [1], то в дискретных системах это происходит на целом интервале интенсивности. Общей особенностью дискретных волн переключения служит то, что форма фронта и скорость движущейся волны меняются со временем квазипериодически (рис. 6). В связи с этим имеет смысл говорить о средней скорости таких волн.

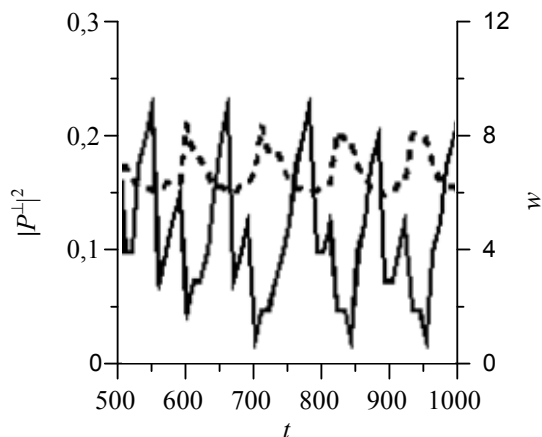


Рис. 6. Временное изменение максимальной интенсивности отклика на фронте (штриховая кривая, левая шкала) и ширины фронта w (сплошная кривая, правая шкала, в единицах расстояния между элементами) движущейся волны переключения в условиях рис. 5, б (кривая б, $I = 0,88 \times 10^{-4}$). Ширина фронта w определялась как длина промежутка, на котором интенсивность волны спадает от максимального значения не менее чем в 100 раз

При изменении интенсивности поддерживающего излучения скорость волны переключения меняется, в том числе по знаку. При этом мы считаем скорость V положительной, если со временем при передвижении фронта увеличивается число элементов с большей амплитудой отклика (рис. 5, б, в отличие от рис. 5, а, где $V < 0$). Зависимость скорости волны переключения V от интенсивности падающего излучения I приведена на рис. 7. Для удобства диапазон изменения I разделен на 6 областей. Хотя в области 1 ($0,0381 \times 10^{-4} < I < 0,46 \times 10^{-4}$) и имеется бистабильность однородных состояний бесконечной цепочки, по-видимому, область притяжения верхнего квазиоднородного состояния столь узка, что практически оно неустойчиво (из-за неизбежных в расчете возмущений). При этом исходное ступенчатое распределение быстро сваливается в нижнее квазиоднородное состояние, так что волны переключения отсутствуют. В области 2 ($0,46 \times 10^{-4} < I < 0,56 \times 10^{-4}$) существует как неподвижная, так и отрицательная ($V < 0$) волны переключения (рис. 5, а). В области 3 ($0,56 \times 10^{-4} < I < 0,836 \times 10^{-4}$) существует только неподвижная волна переключения. В области 4 ($0,836 \times 10^{-4} < I < 0,9216 \times 10^{-4}$) существует как неподвижная, так и движущаяся с положительной скоростью ($V > 0$) волна переключения (рис. 5, б). При $I > 0,9216 \times 10^{-4}$ происходит скачкообразный переход из режима с $V = 0$ в режим с $V > 0$. В области 5 ($0,9216 \times 10^{-4} < I < 2,045 \times 10^{-4}$) существуют только волны переключения с положительной скоростью. Заметим, что приблизительно при $I > 1,4 \times 10^{-4}$ уже трудно получить одиночную волну переключения, так как из-за краевых эффектов неизбежно порождается встречная волна.

Все эти области 1–5 находятся внутри области пространственной бистабильности квазиоднородных состояний. Однако и вне этой области, но внутри области бистабильности для бесконечной цепочки, имеются метастабильные волны переключения. Дело в том, что дестабилизирующее действие краевых

эффектов происходит не мгновенно, и если время их развития превышает время распространения фронта по конечной цепочке, то неустойчивость будет существенно подавлена. Поэтому при $2,045 \times 10^{-4} < I < 2,9 \times 10^{-4}$ (область 6) имеются метастабильные волны переключения с положительной скоростью. Наконец, при $I > 2,9 \times 10^{-4}$ даже метастабильных (со значительным временем жизни) волн переключения нет, переход на исходной ступеньке из нижнего состояния в верхнее происходит практически сразу, скачком.

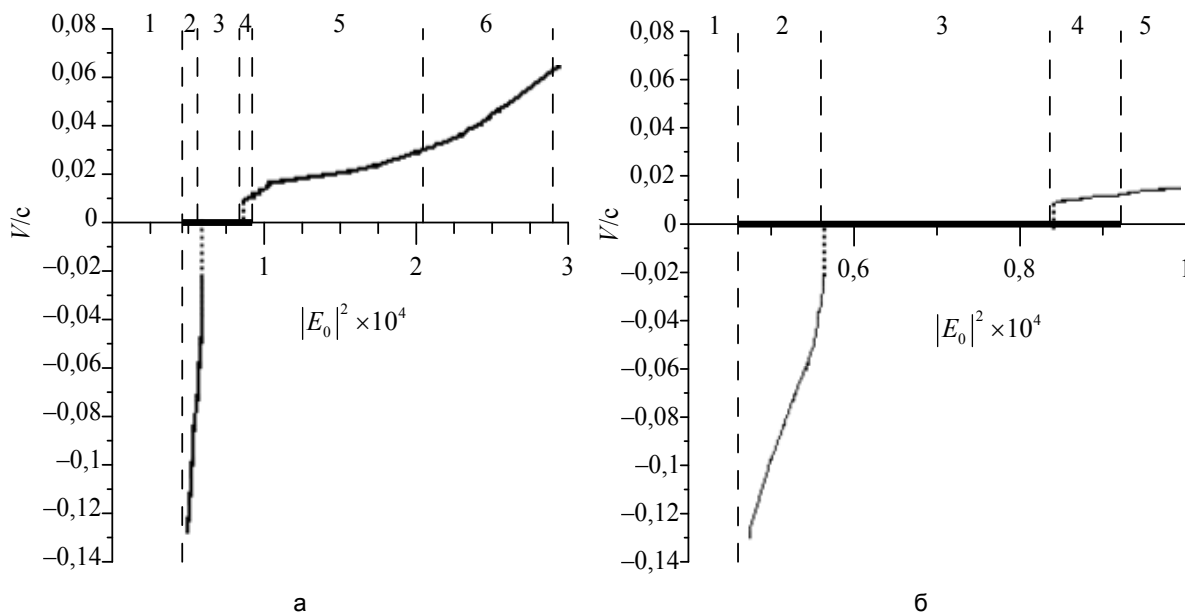


Рис. 7. Зависимость скорости волны переключения V/c от интенсивности поддерживающего излучения $I = |E_0|^2$ (а). То же, укрупненно (б)

Векторные волны переключения ($\theta \neq 0$). Если внешнее излучение содержит обе поляризационные компоненты, то, как указывалось выше, возникают следующие особенности. Во-первых, в соответствии с рис. 3, б, может иметь место мультистабильность (тристабильность) квазиоднородных состояний, из-за чего возможны новые типы волны переключения и, как результат их столкновения, новые типы солитонов. Во-вторых, развитие модуляционной неустойчивости некоторых из квазиоднородных состояний может при нелинейном ограничении приводить к бистабильности между квазиоднородным и пространственно промодулированным состоянием и соответственно к волнам переключения между такими состояниями. В этом разделе мы ограничимся изучением только второй возможности, выбирая параметры так, чтобы они отвечали бистабильности квазиоднородных распределений.

При $\theta = 0,12\pi$ и $|E_0|^2 = 0,0001$ квазиоднородное состояние на верхней ветви устойчиво, а на нижней – модуляционно неустойчиво, со временем оно превращается в стационарное пространственно промодулированное состояние. Как показывает рис. 8, исходное ступенчатое распределение возбуждает волну переключения, фронт которой со временем надвигается на промодулированное состояние. Для цепочки конечной длины фронт останавливается на некотором расстоянии от края цепочки.

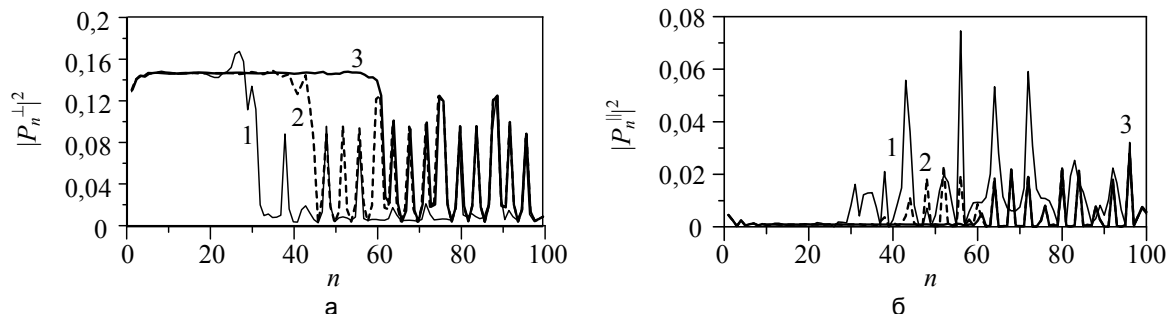


Рис. 8. Интенсивность перпендикулярной (а) и параллельной (б) составляющей поля при $\theta = 0,12\pi$ и $|E_0|^2 = 0,0001$. Исходное распределение – ступенчатое. Кривые 1, 2, 3 – соответственно распределения полей в моменты времени $t = 500, 2000$ и 3500 (установившаяся структура)

При меньшем значении интенсивности $|E_0|^2 = 0,000088$ и $\theta = 0,12\pi$ фронт между квазиоднородным и промодулированным состояниями неподвижен даже вдали от краев цепочки. Устанавливается стационарное распределение (рис. 9), т.е. ступенька практически сразу останавливается.

Наконец, при $|E_0|^2 = 0,0001$ и $\theta = 0,1\pi$ и ниже, и верхнее квазиоднородные состояния устойчивы. В этом случае волны переключения – того же типа, как в скалярном случае ($\theta = 0$). Движение фронта ВП не останавливается краевыми эффектами (рис. 10).

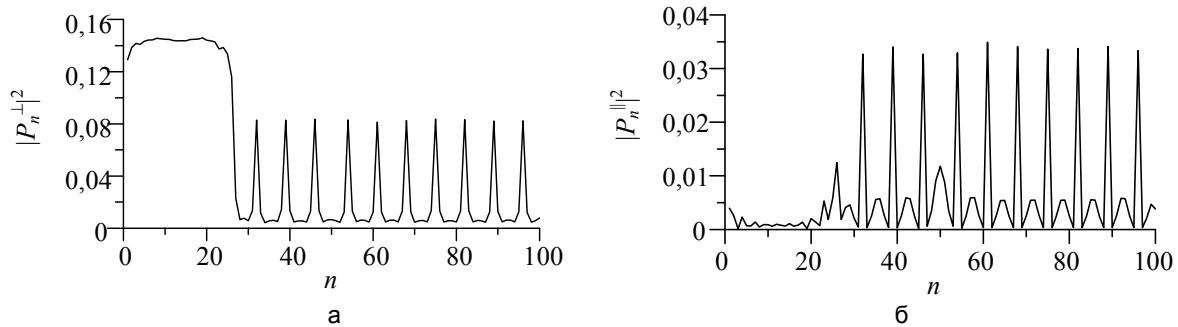


Рис. 9. Интенсивность перпендикулярной (а) и параллельной (б) составляющей отклика при $|E_0|^2 = 0,000088$ и $\theta = 0,12\pi$

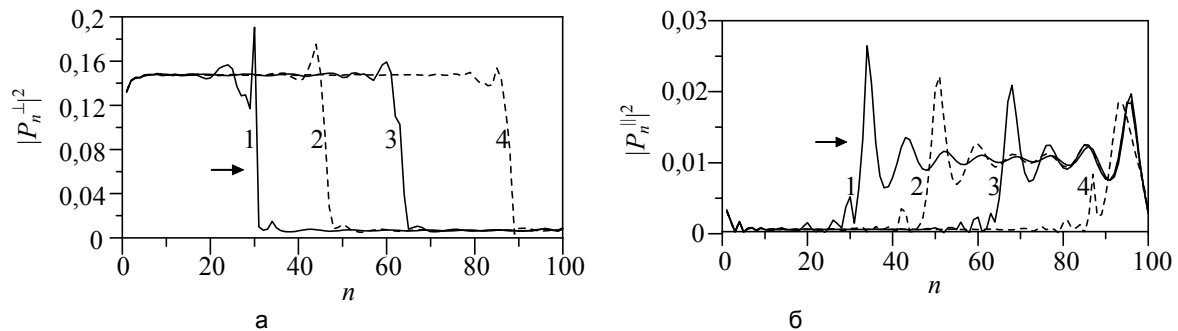


Рис. 10. Движущаяся волна переключения в условиях классической бистабильности для перпендикулярной (а) и параллельной (б) составляющей отклика. Кривые 1, 2, 3, 4 – соответственно распределения полей в моменты времени $t = 500, 2500, 4500, 7000$; $|E_0|^2 = 0,0001$, $\theta = 0,1\pi$

Скалярные дискретные диссипативные солитоны (модель 2, $\theta = 0$)

Важным сценарием формирования диссипативных солитонов служит столкновение волн переключения. Поскольку в рассматриваемой системе возможны такие волны различных типов, то число сценариев увеличивается.

Столкновение волн переключения с нулевой и положительной скоростью ($I = 0,88 \cdot 10^{-4}$, область 4 рис. 7). На рис. 11, а, справа движется волна навстречу неподвижной волне в левой половине цепочки.

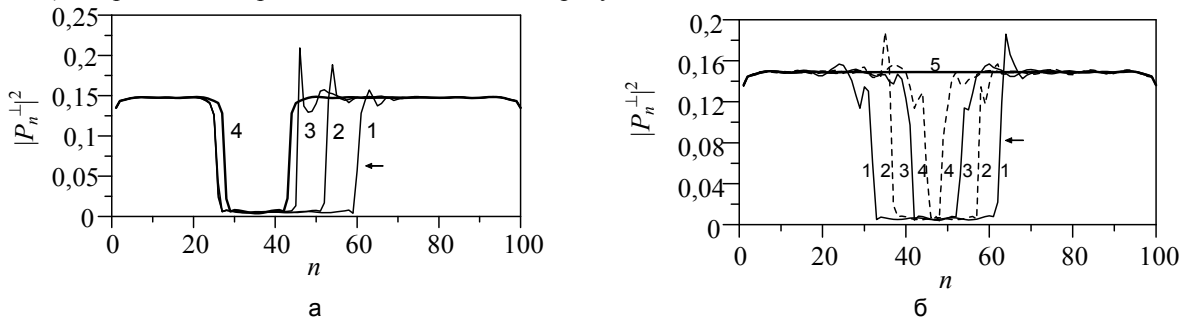


Рис. 11. Динамика столкновения волн переключения. Кривые 1, 2, 3, 4 – соответственно распределения интенсивности отклика в моменты времени $t = 1000, 2000, 3000$ и 4000 , $I = 0,88 \cdot 10^{-4}$ (а), кривые 1, 2, 3, 4, 5 – соответственно распределения интенсивности отклика в моменты времени $t = 1000, 1500, 2000, 2500$ и 5000 , $I = 0,95 \cdot 10^{-4}$ (б)

Движущаяся справа волна останавливается с образованием темного солитона, включающего 15 элементов. Левая «неподвижная» волна в самом конце столкновения сдвигается и останавливается. Ана-

логичные, но более узкие темные солитоны формируются при больших интенсивностях I , вплоть до $I = 0,94 \cdot 10^{-4}$, когда устанавливается солитон с шириной, отвечающей 6 элементам. Но уже при $I = 0,95 \cdot 10^{-4}$ сталкивающиеся волны переключения не останавливаются, а аннигилируют, результирующее поле стационарно и имеет квазиоднородное распределение (кривая 5 на рис. 11, б).

Столкновение волн переключения с нулевой и отрицательной скоростью (область 2 рис. 7). Аналогично предыдущему сценарию, в результате взаимодействия двух волн переключения образуются солитоны, но теперь они светлые. На рис. 12, а, приведены профили результирующих стационарных распределений поля для различных значений интенсивности поддерживающего излучения I . Самый узкий солитон, соответствующий $I = 0,5510 \times 10^{-4}$, имеет ширину 2 элемента. Динамика формирования таких солитонов показана на рис. 11, б. Аннигиляцию волн переключения с нулевой и отрицательной скоростью иллюстрирует рис. 13.

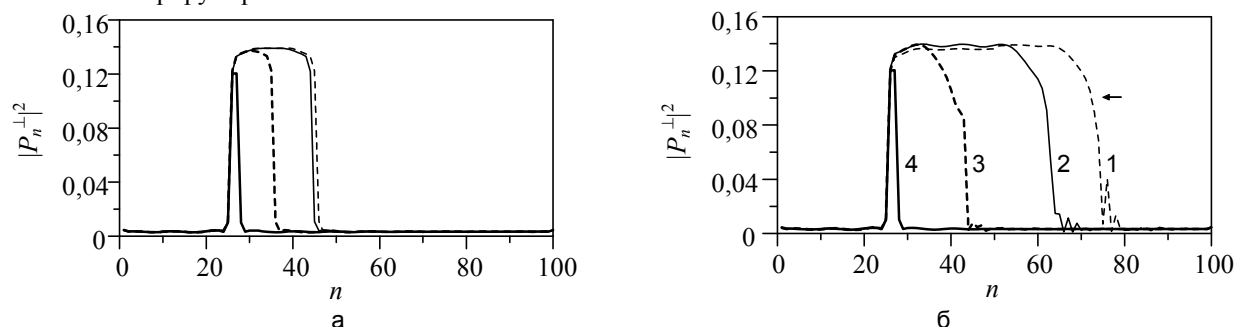


Рис. 12. Установившиеся солитоны при различных значениях интенсивности: пунктирная, сплошная, пунктирная жирная, сплошная жирная кривые соответствуют значениям

$|E_0|^2 \times 10^4 = 0,555; 0,552; 0,5513; 0,5510$ (а); динамика образования солитона с шириной $w = 2$ при столкновении волны переключения, движущейся налево (кривые 1–4 отвечают моментам времени $t = 0, 500, 1500, 3000$) с неподвижной волной переключения; $I = 0,000551$ (б).

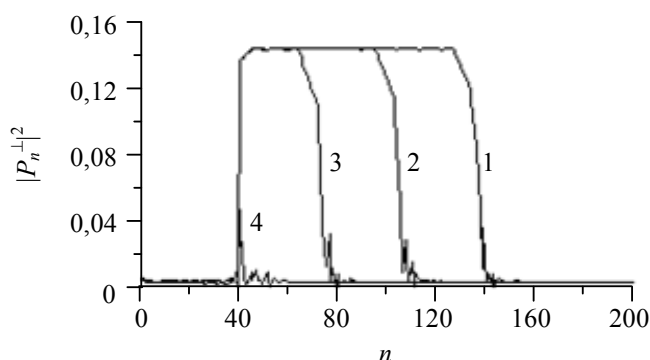


Рис. 13. Левый фронт практически неподвижен, а правый фронт движется налево (кривые 1–4 соответствуют моментам $t = 200, 1600, 2800, 4000$), где сталкивается с неподвижным фронтом, и фронты схлопываются; $I = |E_0|^2 = 0,5476 \times 10^{-4}$

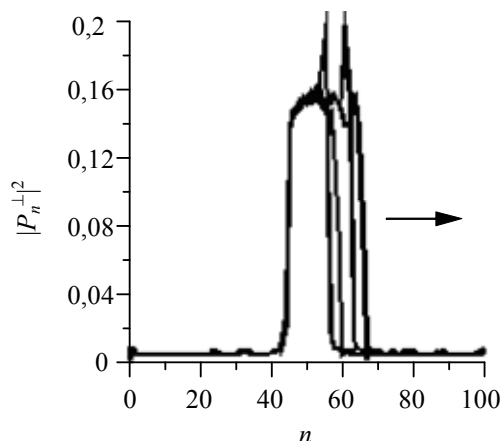


Рис. 14. Одностороннее расширение области возбуждения цепочки между фронтами неподвижной ВП (слева) и ВП, движущейся с положительной скоростью. Моменты (слева направо) $t = 500, 1000, 1500, 2000$; $I = |E_0|^2 = 0,8491 \times 10^{-4}$ (область 3 рис. 7)

Если фронт движущейся волны переключения не приближается к фронту неподвижной волны, а удаляется от него, и начальное расстояние между фронтами не слишком мало, то возникает расширяющаяся со временем область повышенного возбуждения (рис. 14). При значительном расстоянии между фронтами эти две волны переключения практически не взаимодействуют друг с другом (расширение в одну сторону).

Диссипативные солитоны могут формироваться и по другим сценариям, например, при подаче на цепочку дополнительного «записывающего» узкого пучка-импульса или нескольких пучков-импульсов. Примеры установившихся структур приведены на рис. 15. При выходе за границы области устойчивости, например, для модели 1, характерно появление пульсирующих солитонов. Рис. 16 демонстрирует, также для модели 1, возможность управляемого передвижения устойчивых солитонов по цепочке.

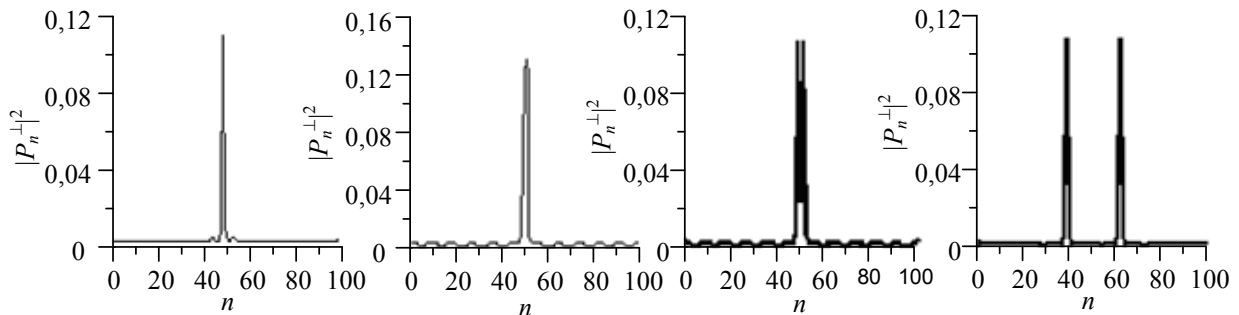


Рис. 15. Примеры узких светлых солитонов; $I = |E_0^\perp|^2 = 0,5329 \times 10^{-4}$ (область 1 рис. 7)

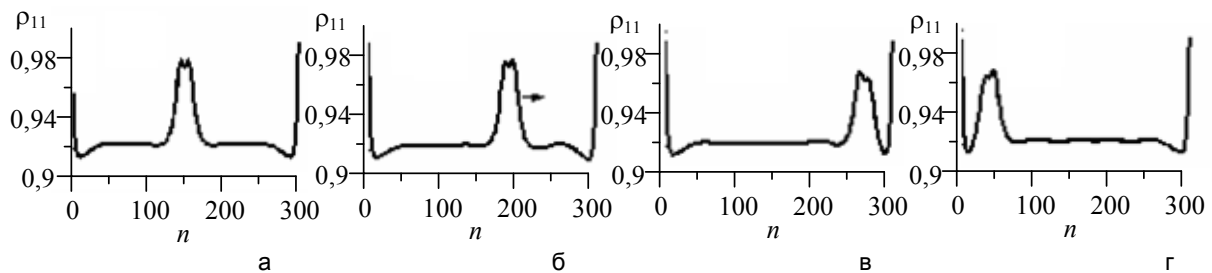


Рис. 16 (модель 1). Управление движением солитона при наклонном падении поддерживающего излучения. Профили населенности основного состояния молекул в цепочке в различные моменты времени t : $t = 0$, угол падения $\theta = 0$, солитон неподвижен (а); $t = 50$, угол падения $\theta = 0,1$, солитон движется направо (б); $t = 300$, угол падения $\theta = 0,1$, солитон останавливается у правого края цепочки (в); $t = 700$, угол падения $\theta = -0,1$, солитон двигается налево и останавливается у левого края цепочки (г)

Двумерные локализованные структуры (модель 3)

Более удобна для анализа двумерных решеток схема разомкнутых кольцевых резонаторов (модель 3, рис. 2) В этом случае схема существенно анизотропна, так как взаимодействие резонаторов зависит от их относительной ориентации. При фиксированной ориентации устойчивыми оказываются только сравнительно узкие двумерные солитоны (рис. 17). Широкие же исходные структуры обычно распадаются на набор узких солитонов вследствие модуляционной неустойчивости.

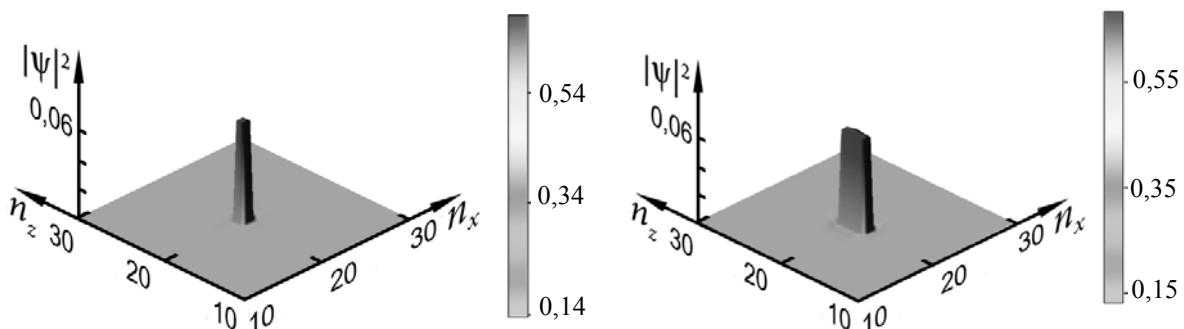


Рис. 17. Два примера двумерных солитонов в модели 3; шкала для намагниченности $|\psi|^2$ указана справа от рисунков, положение резонаторов задается целыми индексами n_x и n_z

Трехмерные локализованные структуры (модель 3)

Трехмерные структуры также проще анализировать в решетке разомкнутых кольцевых резонаторов (модель 3). Ограничимся здесь демонстрацией, по-видимому, наиболее яркого примера топологических – узловых – дискретных диссипативных солитонов (рис. 18). Условия отвечают бистабильности, когда каждый из слабо взаимодействующих элементов может находиться в основном или возбужденном состоянии. Темными шариками обозначены резонаторы в возбужденном состоянии. Такие шарiki соединяются линией, если расстояние между ними не превышает шага решетки. Линия будет узловой, если она замкнута, не содержит самопересечений и не превращается в окружность при плавных деформациях. Представленные на рис. 18 примеры свидетельствуют о чрезвычайном разнообразии дискретных диссипативных солитонов, которое можно наблюдать в нелинейных магнитных метаматериалах.

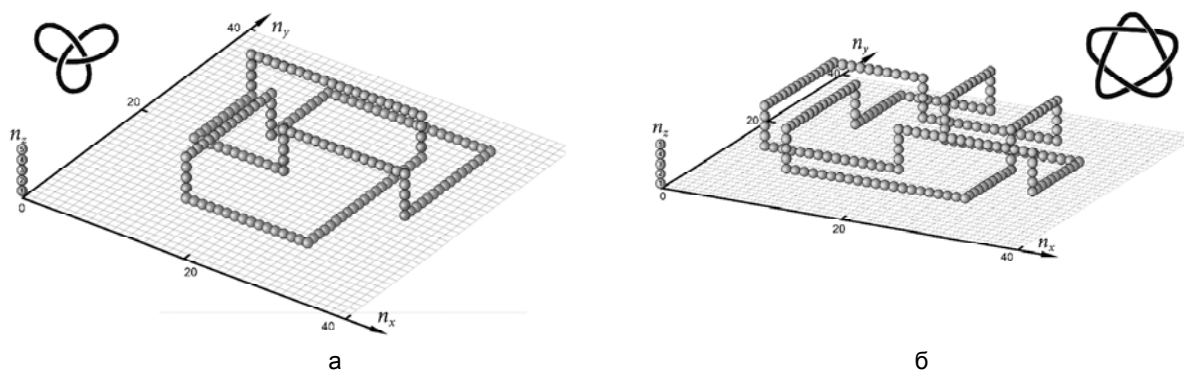


Рис. 18. Устойчивые узловые солитоны в модели 3: «трилистник» (а) и «звезда» (б). На врезках показаны проекции узловой линии на плоскость

Заключение

Три рассмотренных модели дискретных нелинейных диссипативных систем, резонансно раскачиваемых когерентным поддерживающим излучением, обладают качественно аналогичными свойствами, хотя и при резко различающихся масштабах (единицы нанометров для модели 1 и доли миллиметра для модели 3). Совместное рассмотрение этих моделей позволяет получить более полную картину формирования разнообразных структур. Если в модели 1 уже продемонстрирована возможность управления положением солитонов с помощью наклонного падения поддерживающего излучения, то в модели 2 привлекает появление дополнительной – поляризационной – степени свободы, а в модели 3 – сравнительная легкость формирования топологических трехмерных солитонов. Представляется, что экспериментально более просто реализовать формирование солитонов в модели 3, что послужит проверкой правильности общей картины и будет способствовать разработке новых подходов к обработке информации.

Работа поддержана грантами Министерства образования и науки Российской Федерации и НИУ ИТМО №411402.

Литература

1. Розанов Н.Н. Диссипативные оптические солитоны. От микро- к нано- и атто-. – М.: Наука, 2011. – 536 с.
2. Denz C., Flach S., Kivshar Yu.S., eds. Nonlinearities in Periodic Structures and Metamaterials. – Berlin: Springer-Verlag, 2010. – 202 p.
3. Носков Р.Е. Метаматериалы. От левосторонних сред к нелинейной плазмонике. – Lambert Academic Publishing, 2011. – 116 с.
4. Litchinitser N.M., Gabitov I.R., Maimistov A.I., Shalaev V.M. Linear and Nonlinear Metamaterials and Transformation Optics, in book «Tutorials in Metamaterials», Eds. M.A. Noginov and V.A. Podolskiy; series in Nano-Optics and Nanophotonics, Series Eds. S. Kawata and V.M. Shalaev. – CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, NY, 2012. – P. 1–27.
5. Rosanov N.N., Fedorov S.V., Shatsev A.N., Vyssotina N.V. Dissipative molecular solitons // Eur. Phys. J. D. – 2010. – V. 59. – P. 3–12.
6. Noskov R.E., Belov P.A., and Kivshar Yu. S. Subwavelength modulational instability and plasmon oscillons in nanoparticle arrays // Phys. Rev. Lett. – 2012. – V. 108. – P. 093901.
7. Noskov R.E., Belov P.A., and Kivshar Yu.S. Subwavelength plasmonic kinks in arrays of metallic nanoparticles // Optics Express. – 2011. – V. 20. – P. 2733–2739.
8. Shadrinov I.V., Zharov A.A., Zharova N.A., Kivshar Yu.S. Nonlinear magnetoinductive waves and domain walls in composite metamaterials // Photonics and nanostructures – Fundamentals and Applications. – 2006. – V. 4. – P. 69–74.

9. Lazarides N., Eleftheriou M., Tsironis G.P. Discrete breathers in nonlinear magnetic metamaterials // Phys. Rev. Lett. – 2006. – V. 97. – P. 157406.
10. Eleftheriou M., Lazarides N., Tsironis G.P. Magnetoinductive breathers in metamaterials // Phys. Rev. E. – 2008. – V. 77. – P. 036608.
11. Lazarides N., Tsironis G.P., Kivshar Yu.S. Surface breathers in discrete magnetic metamaterials // Phys. Rev. E. – 2008. – V. 77. – P. 065601.
12. Molina M., Lazarides N., Tsironis G.P. Bulk and surface magnetoinductive breathers in binary metamaterials // Phys. Rev. E. – 2009. – V. 80. – P. 046605.
13. Cui W., Zhu Y., Li H., Liu S. Soliton excitation in a one-dimensional nonlinear diatomic chain of split-ring resonators // Phys. Rev. E. – 2010. – V. 81. – P. 016604.
14. Розанов Н.Н., Высотина Н. В., Шацев А.Н., Шадривов И.В., Кившарь Ю.С. Гистерезис волн переключения и диссипативные солитоны в нелинейных магнитных метаматериалах // Письма в ЖЭТФ. – 2011. – Т. 93. – С. 838–841.
15. Rosanov N.N., Vysotina N.V., Shatsev A.N., Shadrivov I.V., Powell D.A., Kivshar Yu.S. Discrete dissipative localized modes in nonlinear magnetic metamaterials // Optics Express. – 2011. – V. 19. – P. 26500–26505.
16. Rosanov N.N., Vysotina N.V., Shatsev A.N., Desyatnikov A.S., Kivshar Yu.S. Knotted solitons in nonlinear magnetic metamaterials // Phys. Rev. Lett. – 2012. – V. 108. – P. 133902.

Розанов Николай Николаевич	– НПК «ГОИ им. С.И. Вавилова», член-корр. РАН, доктор физ.-мат. наук, начальник отдела; НИУ ИТМО, зав. кафедрой, ngosanov@yahoo.com
Высотина Нина Вениаминовна	– НПК «ГОИ им. С.И. Вавилова», научный сотрудник, nvvyss@yahoo.com
Шацев Анатолий Натанович	– НПК «ГОИ им. С.И. Вавилова», кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, anshat@yahoo.com
Десятников Антон Сергеевич	– Австралийский национальный университет, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, asd124@physics.anu.edu.au
Шадривов Илья Владимирович	– Австралийский национальный университет, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, ivs124@physics.anu.edu.au
Носков Роман Евгеньевич	– Санкт-Петербургский Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, nanometa@gmail.com
Кившарь Юрий Семенович	– Австралийский национальный университет, академик Австралийской академии наук, профессор, ysk@physics.anu.edu.au

УДК 535.6, 681.78

**ВОЗМОЖНОСТИ СОРТИРОВКИ АЛМАЗНОГО СЫРЬЯ
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫМИ МЕТОДАМИ**

Е.В. Горбунова, В.В. Коротаев, А.Н. Чертов

Рассмотрены существующие проблемы в области сортировки необработанного алмазного сырья в соответствии с классификационными признаками, определяющими рыночную стоимость алмазов. Предложено подойти к процессу качественной оценки и аттестации кристаллов алмаза с использованием элементов теории цветовых измерений и моделей описания цвета многопараметрического объекта, а также закономерностей формирования и роста кристаллов.

Ключевые слова: сырье алмазное, метод оптико-электронный, сортировка по цвету, форма кристалла.

Введение

В настоящее время все ключевые предприятия отечественной промышленности, специализирующиеся в области сортировки алмазного сырья, такие как Единая сбытовая организация Акционерной Компании (АК) «АЛРОСА» («ЕСО АЛРОСА») в г. Москве, Якутское предприятие по торговле алмазами АК «АЛРОСА» (ЯПТА) в г. Якутске, предприятие «Коммерал» в г. Мирном, вынуждены пересматривать подходы к организации технологического процесса сортировки и аттестации готовой продукции и заниматься техническим перевооружением производства.

Указанное обстоятельство обусловлено новыми требованиями изменившегося за последние годы мирового алмазного рынка, необходимостью сохранения высокого качества продукции и повышения конкурентоспособности.

Среди приоритетных задач, требующих скорейшего решения:

- повышение производительности труда и эффективности производства;
- получение стабильно высокого качества сортировки, не зависящего от человеческого фактора;
- расширение товарной номенклатуры продукции.

Наиболее перспективным и в то же время наиболее сложным и наукоемким направлением развития технологии сортировки является автоматизация производственного процесса качественной сортировки алмазного сырья.

Известны следующие сортировочные комплексы, используемые или имеющие перспективы использования в отечественной алмазной промышленности.

- Установки фирмы Sortex для разделения алмазов по цвету и вибростолы с наклонной декой для сортировки по форме, стоящие на вооружении АК «АЛРОСА» [1]. Первые широко используются для сепарации различных сельскохозяйственных культур и пригодны, главным образом, для разделения материалов по критерию «черное/белое», т.е. «темнее/светлее установленной границы»; вторые не позволяют производить точную сортировку и фактически осуществляют только обогащение материала той или иной формой алмазов. И в том, и в другом случае требуется этап окончательной, ручной до-сортировки.
- Сепаратор АРЦ-10 производства конструкторско-технологического института научного приборостроения Сибирского отделения РАН для сортировки алмазов размером 1,5–6 мм по цвету [2]. Одним из основных недостатков указанного оборудования является использование заложенной в основу алгоритма его работы стандартной для видеооборудования цветовой модели RGB, которая не является объективной с точки зрения анализа цвета [3]. Как следствие, невозможны оценки малых цветовых различий, установка точных цветовых порогов и допусков при осуществлении контроля качества продукции.
- Экспериментальный образец оптического узла и программное обеспечение для аппарата сортировки алмазов по форме Института менеджмента и информационных технологий (ИМИТ, г. Череповец) [4]. Особенностью предлагаемого решения является использование 9 каналов регистрации, синхронно формирующих 9 проекций кристалла для восстановления его формы. Такой подход сильно увеличивает стоимость всей системы за счет большого количества измерительных каналов, сложности синхронизации их работы и необходимости использования высокопроизводительных вычислительных систем для обработки массива полученных изображений, а также их «сшивания» в единый объект. Кроме того, по тем же самым причинам, он не позволяет обеспечить высокую производительность сортировочного аппарата.

Из всего сказанного следует заключить, что на настоящий момент актуальная задача автоматизации процесса качественной сортировки алмазного сырья в России остается нерешенной и требует принципиально нового, отличного от уже используемых, комплексного научно-методического подхода.

Современные требования к технологическим процессам сортировки и аттестации природных необработанных алмазов

Основные классификационные признаки кристаллов алмаза и требования к процессу их сортировки регламентируются государственными стандартами [5, 6]. Согласно указанным нормативным документам, кристаллы алмаза должны быть рассортированы на 13 классов по форме, 9 классов по дефектности (качеству) и 34 – по цвету. Объединенная классификация по совокупности всех перечисленных параметров включает 29 позиций.

В частности, по цветовым параметрам, в зависимости от интенсивности и оттенка, минералы (в особенности драгоценные и полудрагоценные камни) обычно подразделяют на следующие основные группы: бесцветные, с незначительным оттенком цвета, с небольшим оттенком цвета, с оттенком цвета, цветные (с выраженным оттенком в объеме камня), цветные (с ярко выраженным оттенком в объеме камня), цветные (с густой окраской в объеме камня). При этом некоторые камни имеют «комбинированный» цвет (например, желто-коричневые, коричнево-желтые, зеленовато-желтые и т.п.).

Как видно из [5], качественные характеристики групп часто близки друг другу и выражены в субъективной форме, поясняющей принципы сортировки алмазного сырья для опытного человека-сортировщика, но не для автоматизированного комплекса. Для примера: кристаллы «с видимым желтым, зеленым, аквамаринным, серым или незначительным коричневым оттенком» («цветовая» группа 411); «с ясно видимым желтым, зеленым, лимонным, аквамаринным или серым оттенком» («цветовая» группа 412); «желтые, с желтым, зеленым, лимонным нацветом во всем объеме» («цветовая» группа 414) и т.д. То же самое касается классификации кристаллов алмаза по форме и качеству.

Таким образом, для обеспечения автоматизации технологического процесса требуется строгая формализация всех классификационных признаков – их описание для автоматизированной оптоэлектронной системы контроля (ОЭСК).

Исследование возможностей параметризации кристалла алмаза для ОЭСК.

Классификация по форме

Согласно теории кристаллографии [7], все кристаллы могут быть сгруппированы в 7 главных кристаллографических систем (сингоний). Любой кристалл может быть отнесен к одной из 7 сингоний путем простого определения элементов его внешней симметрии. С учетом того, что не все кристаллы какой-либо сингонии имеют ее полную (нормальную) симметрию, выделяют дополнительные классы в пределах каждой сингонии. Всего существует 32 класса, совокупность которых описывает внешнюю симметрию всех кристаллов. Каждый кристаллический класс, в свою очередь, описывается классом арифметическим, представляющим собой конечную группу целочисленных матриц, определяющих возможные преобразования симметрии кристалла относительно некоторого «эталонного» его положения в пространстве, принятого за «точку отсчета» [8]. Таким образом, заранее можно описать и впоследствии, в процессе анализа, определить наклон и (или) поворот кристалла относительно канала регистрации автоматической системы контроля.

Для установления принадлежности анализируемого кристалла к определенному арифметическому, а значит, и кристаллическому классу, предлагается использовать стереографические проекции, дающие возможность математического описания проекций конкретного кристаллического образца. При этом применяется метод последовательных приближений для оценки степени соответствия каждой полученной стереографической проекции анализируемого кристалла стереографическим проекциям, описывающим кристаллы идеально правильной формы.

Помимо матричного описания [7, 8] возможно описание классификационных признаков эталонных видов кристаллов посредством задания количества и пространственного взаимного положения их граней или ребер. Такие математические модели могут быть описаны в декартовой или сферической системах координат. Например, в декартовой системе координат математическая модель правильного кристалла алмаза (октаэдра) может выглядеть следующей совокупностью поверхностей, описывающих взаимное расположение граней кристалла (модель соответствует единичному кристаллу):

$$oct(x, y) = \begin{cases} 0,5 - x - y & \text{при } (x + y) < 0,5 \\ x + y - 0,5 & \text{при } (x + y) \leq 0,5 \\ -0,5 - x + y & \text{при } (x - y) > -0,5 \\ x - y + 0,5 & \text{при } (x - y) \geq -0,5 \\ -x - y - 0,5 & \text{при } (x + y) > -0,5 \\ x + y + 0,5 & \text{при } (x + y) \geq -0,5 \\ -x + y + 0,5 & \text{при } (x - y) < 0,5 \\ x - y - 0,5 & \text{при } (x - y) \leq 0,5 \end{cases}$$

Используя подобное описание и зная пространственное расположение элементов освещения объекта и примерные данные о показателе преломления исследуемых образцов кристаллов, можно построить трехмерные модели реальных кристаллов алмазов (рис. 1).

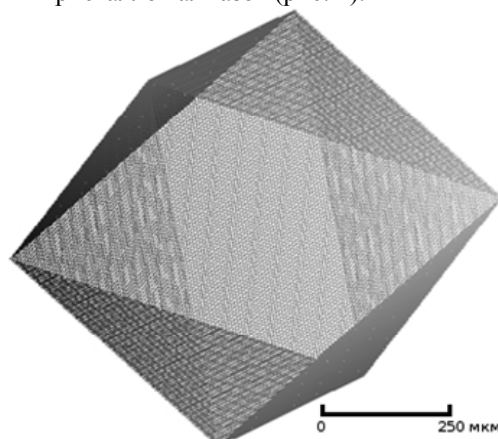


Рис. 1. Трехмерная модель кристалла алмаза в декартовой системе координат

Собственно алгоритм определения формы кристаллов в автоматическом режиме предлагается реализовывать в трех частях.

Первая часть алгоритма включает в себя следующие этапы:

- предположение о соответствии между набором характерных элементов изображения и набором характерных элементов объекта; выработка гипотезы о положении и ориентации объекта;
- восстановление сцены или формирование математической модели описания проекции объекта;
- сравнение восстановленной сцены с реальным изображением и, при достаточном сходстве, принятие гипотезы.

Вторая часть алгоритма предназначена для восстановления 3D-формы объекта или формирования его математического описания.

Третья часть алгоритма необходима для того, чтобы найти оси симметрии объекта на основании анализа его математической модели и определить степень искажения анализируемого кристалла.

Использование предложенного подхода позволит не только обеспечить необходимое значение вероятности правильной классификации, но и реализовать гибкий алгоритм настройки и обучения ОЭСК (в ручном или автоматическом режиме) при изменении требований к различаемым градациям формы алмазов.

Классификация по цвету

При разработке современных ОЭСК цветовых параметров движущихся объектов большое внимание, как правило, уделяется алгоритмической составляющей сегментации изображения и коррекции его смаза, количеству различаемых градаций цвета, однако практически не упоминается о проблемах, связанных с описанием цветовых параметров объекта регистрации для самой ОЭСК. В то же время правильное представление цвета объекта регистрации определяет динамический диапазон (количество определяемых ОЭСК цветовых параметров объекта) и точность работы системы.

Для того чтобы результаты анализа цвета не зависели от свойств поверхности, формы и положения кристаллов алмаза в пространстве относительно ОЭСК, наличия различного рода поверхностных дефектов, а также от изменения параметров освещения и расположения источников освещения, необходимо привязать цвет кристалла алмаза к его объективным параметрам. Такими параметрами для любого объекта при анализе цвета как раз и являются его форма и ориентация в пространстве, а также спектральный коэффициент отражения каждого элемента поверхности, зависящий от особенностей ее структуры и свойств самого объекта. Осуществлять привязку цветовых параметров кристалла алмаза к цветовым координатам изображений его проекций предлагается с использованием «цветового образа» [9] – комплексной характеристики объекта, определяемой совокупностью описывающих его свойства функций. При этом компоненты цветового образа являются тождественно связанными с координатами цветового пространства HLS, лишенного недостатков, присущих модели RGB –неравномерности отображения цветов и взаимозависимости отдельных координат.

После пересчета из RGB в HLS (рис. 2) выполняется выделение областей заданной (требуемой) цветности, а затем процесс сегментации изображения. После этого определяется энергетический центр приоритетной области цвета на изображении объекта исследования и вычисляются координаты ее энер-

гетического центра на матрице. Результатами вычислений являются наличие тех или иных областей цветности на изображении объекта, их размеры и координаты энергетических центров областей на матрице.

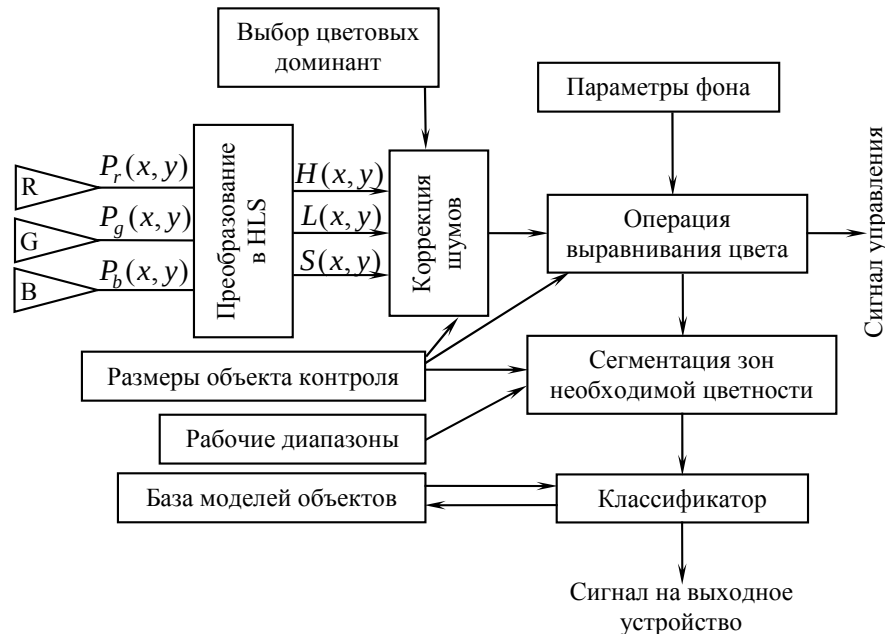


Рис. 2. Структура алгоритма обработки изображения кристаллов алмаза при их классификации по цвету

Предложенный подход к описанию цвета кристаллов алмаза с помощью цветового образа и реализация алгоритма их классификации, с учетом необходимости пересчета цветовых координат изображений в более подходящую для анализа цвета модель HLS, позволяет добиться снижения погрешности определения цветов, особенно близких цветовых оттенков, и, как следствие, увеличения количества определяемых цветовых классов.

Схема построения автоматизированной ОЭСК

На основании проведенных исследований предложена следующая универсальная схема построения ОЭСК кристаллов алмаза для их классификации по цвету, форме и качеству.

ОЭСК должна содержать 3–4 цветные камеры, пространственно разнесенные друг относительно друга на 120° для трех камер и $109^\circ 27' 50''$ – для четырех камер. Процесс съема информации с камер синхронизируется с моментом входа кристалла алмаза в зону анализа, что позволит сократить объем обрабатываемой информации и снизить требования к используемым камерам по скорости работы. Время экспозиции выбирается из условий достаточной для анализа формы освещенности кристалла алмаза и минимизации смаза изображения.

В качестве источников излучения узла освещения, обеспечивающего равномерное освещение зоны анализа, рационально использовать светодиодные источники, которые, в том числе, позволят обеспечить регулировку уровня освещенности поля анализа в широких пределах и необходимую подстройку под выбранное значение экспозиции. Оптимальный с точки зрения авторов работы вариант схемы построения ОЭСК представлен на рис. 3.

По результатам проведенных исследований и расчетов приблизительная раскладка по временному циклу процесса классификации (всего 35–40 мс) составила:

- время экспозиции – 5–10 мкс;
- время передачи изображения – 5 мс (возможно уменьшить до 300 мкс);
- предварительная обработка (пространственная фильтрация полновесного изображения) одного канала цветности – 300 мкс;
- выделение вспомогательных параметров – 20 мс;
- определение признаков класса – 10 мс;
- классификатор – 40–80 мкс (в зависимости от количества классов).

Таким образом, можно обеспечить сортировку кристаллов алмаза по цвету и форме с производительностью от 20 шт./с.

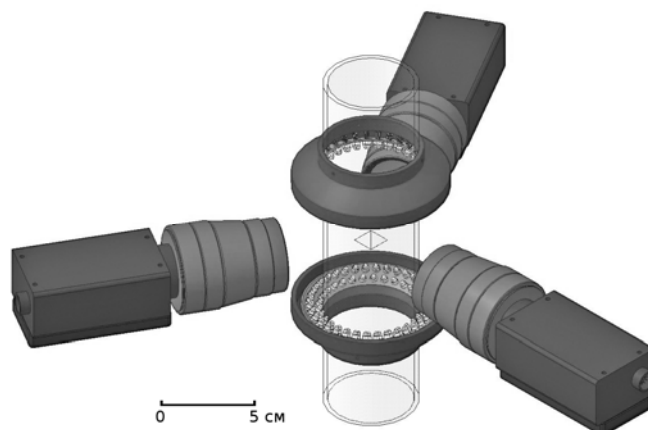


Рис. 3. Вариант расположения концентрических источников узла освещения сверху и снизу от узла регистрации

Заключение

В рамках настоящей работы впервые предложено подойти к процессу качественной оценки и аттестации кристаллов алмаза с использованием элементов теории цветовых измерений и моделей описания цвета многопараметрического объекта, а также теории кристаллографии, т.е. данных о закономерностях формирования и роста кристаллов. Указанный подход позволит расширить диапазон крупности кристаллов, которые могут оцениваться в автоматическом режиме, повысить скорость и качество их сортировки и, как следствие, сделать значительный шаг в развитии технологии аттестации алмазного сырья, отвечающей требованиям современного рынка.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы».

Литература

1. Росэмитент. Актив России: ЗАО «АЛРОСА» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.haileymurphyphotography.com/>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 15.05.2012).
2. Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения РАН. Разработки: РЛЦ-С [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.tdisie.nsc.ru/Rus/arc_rus.html/, свободный. Яз. рус. (дата обращения 15.05.2012).
3. Вакуленко А.Д., Горбунова Е.В., Чертов А.Н. Критерии применимости цветовых пространств в оптико-электронных системах цветового анализа минералов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 3 (79). – С. 156–157.
4. Научно-производственная компания «Малленом»: технология стереозрения и ее приложения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mallenom.ru/form2.php/>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 15.05.2012).
5. ГОСТ Р 51519.1-99. Алмазы природные необработанные. Классификация. Основные признаки. – Введ. 28.12.1999. – М.: Госстандарт России, 2000. – 15 с.
6. ГОСТ Р 51519.2-99. Алмазы природные необработанные. Сортировка алмазов. Основные положения. – Введ. 28.12.1999. – М.: Госстандарт России, 2000. – 8 с.
7. Чупрунов Е.В., Хохлов А.Ф., Фаддеев М.А. Основы кристаллографии: Учебник для вузов. – М.: Издательство Физико-математической литературы, 2006. – 500 с.
8. Галиулин Р.В. Кристаллографическая геометрия. – 2-е изд. – М.: КомКнига, 2005. – 136 с.
9. Горбунова Е.В. Исследование и разработка оптико-электронных систем цветового анализа минерального сырья: Дис. ... канд. тех. наук. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 157 с.

Горбунова Елена Васильевна	– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, vredina_ia@mail.ru
Коротаев Валерий Викторович	– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, декан, korotaev@grv.ifmo.ru
Чертов Александр Николаевич	– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, a.n.chertov@mail.ru

УДК 535.3

ОТРАЖЕНИЕ СВЕТОВЫХ ВОЛН ИЗ МАЛОГО ЧИСЛА КОЛЕБАНИЙ ОТ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА С НЕЛИНЕЙНЫМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЛОЕМ

Е.М. Буяновская, С.А. Козлов, А.А. Сухоруков, Ю.С. Кившарь

Теоретически рассмотрены особенности отражения световых волн из малого числа колебаний от металлического зеркала со слоем нелинейного диэлектрика. Показано, что при отражении импульсов из малого числа колебаний от металлического зеркала с прозрачным диэлектрическим слоем в результате взаимодействия импульсов в диэлектрическом слое происходит генерация излучения утроенных частот, отношение энергии которого к энергии падающего на зеркало импульса увеличивается при уменьшении числа колебаний в нем.

Ключевые слова: импульсы из малого числа колебаний, взаимодействие встречных волн, нелинейные диэлектрические среды.

Введение

Получение световых импульсов предельно коротких длительностей является одним из непрерывно и быстро развивающихся направлений нелинейной оптики. Для импульсов из малого числа колебаний понятие огибающей теряет свое физическое содержание, что не позволяет при описании их распространения в оптических средах эффективно использовать традиционный в оптике метод медленно меняющейся огибающей импульса. По этой причине при решении теоретических задач нелинейной оптики волн из малого числа колебаний анализируется динамика непосредственно поля излучения или его пространственно-временной спектр [1–3].

К настоящему времени изучены многие явления нелинейной оптики таких предельно коротких (по числу колебаний) импульсов – их временное и спектральное уширение и сжатие, самофокусировка, нелинейное отражение, взаимодействие при попутном распространении [4–10]. В работе [11], по-видимому, впервые были выведены уравнения динамики поля световых импульсов из малого числа колебаний при их встречном распространении в нелинейной среде. В настоящей работе на основе аналитических решений этих уравнений рассмотрено взаимодействие встречных импульсов, которое возникает в нелинейной диэлектрической среде при отражении излучения от металлического зеркала (рис. 1). Проанализировано явление генерации высокочастотных волн из малого числа колебаний, возникающей из-за взаимодействия встречных импульсов в рассматриваемой структуре. В связи с неразрушением оптических сред в поле столь коротких импульсов даже при очень высоких интенсивностях излучения [12] такая генерация может оказаться значительной и практически применимой.

Уравнения динамики поля встречных световых волн из малого числа колебаний и их решения

В работе [11] авторами были выведены уравнения, описывающие динамику полей встречных плоских поперечно однородных линейно поляризованных световых волн из малого числа колебаний при их взаимодействии в диэлектрических средах с безынерционной кубической нелинейностью вида

$$\begin{cases} \frac{\partial E_+}{\partial z} + \frac{N_0}{c} \frac{\partial E_+}{\partial t} - a \frac{\partial^3 E_+}{\partial t^3} + b \int_{-\infty}^t E_+ dt' + \frac{cg}{2N_0} \frac{\partial}{\partial t} (E_+^3 + 3E_+^2 E_- + 3E_+ E_-^2) = 0; \\ \frac{\partial E_-}{\partial z} - \frac{N_0}{c} \frac{\partial E_-}{\partial t} + a \frac{\partial^3 E_-}{\partial t^3} - b \int_{-\infty}^t E_- dt' - \frac{cg}{2N_0} \frac{\partial}{\partial t} (E_-^3 + 3E_-^2 E_+ + 3E_- E_+^2) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $E_+(z, t)$ – поле волны, распространяющейся в положительном направлении оси z ; $E_-(z, t)$ – поле волны, распространяющейся ей навстречу; t – время; c – скорость света в вакууме; N_0, a, b – параметры, характеризующие типичную нерезонансную зависимость показателя преломления диэлектрической среды в диапазоне ее прозрачности [13],

$$n = N_0 + ca\omega^2 - cb/\omega^2,$$

от частоты ω ; $g = 4\pi\chi/c^2$ описывает нелинейность ее поляризационного отклика [2]

$$P_{nl} = \chi E^3,$$

где χ – нелинейная восприимчивость среды. В работе [14] методом последовательных приближений Пикара [15] были получены аналитические решения уравнений (1) (предварительно отнормированных так, что $N_0/c = 1$) для среды без дисперсии линейного показателя преломления (т.е. при $a = b = 0$) вида

$$\begin{cases} E_+ = E_+^{(0)} + GE_+^{(1)}; \\ E_- = E_-^{(0)} + GE_-^{(1)}, \end{cases}$$

где $G = 4n_2 I / N_0$ (здесь n_2 – коэффициент нелинейного показателя преломления; I – интенсивность излучения);

$$\begin{cases} E_+^{(0)}(z, t) = E_+^{(0)}(t - z); \\ E_-^{(0)}(z, t) = E_-^{(0)}(t + z), \end{cases}$$

$$E_+^{(1)}(z', \tau) = E_+^{(1)}(z'_0, \tau) - \left[\frac{\partial}{\partial \tau} (E_+^{(0)}(\tau))^3 \right] (z' - z'_0) - 3 \frac{\partial}{\partial \tau} \left[(E_+^{(0)}(\tau))^2 \int_{z'_0}^{z'} E_-^{(0)}(\tau + 2z'') dz'' \right] -$$

$$- 3 \frac{\partial}{\partial \tau} \left[E_+^{(0)}(\tau) \int_{z'_0}^{z'} (E_-^{(0)}(\tau + 2z''))^2 dz'' dz'' \right], \quad z' = z, \quad \tau = t - z, \quad (2)$$

$$E_-^{(1)}(z', \xi) = E_-^{(1)}(z'_0, \xi) + \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (E_-^{(0)}(\xi))^3 \right] (z' - z'_0) + 3 \frac{\partial}{\partial \xi} \left[(E_-^{(0)}(\xi))^2 \int_{z'_0}^{z'} E_+^{(0)}(\xi - 2z'') dz'' \right] +$$

$$+ 3 \frac{\partial}{\partial \xi} \left[E_-^{(0)}(\xi) \int_{z'_0}^{z'} (E_+^{(0)}(\xi - 2z''))^2 dz'' \right], \quad z' = z, \quad \xi = t + z. \quad (3)$$

В (2)–(3) второе слагаемое в правой части каждого из соотношений характеризует самовоздействие светового импульса, распространяющегося от границы нелинейной среды z'_0 в положительном направлении оси z' , а третье и четвертое – взаимодействие встречных импульсов в нелинейной среде.

Взаимодействие встречных световых волн в слое диэлектрика на металлическом зеркале

Отражение световых волн от металлического зеркала с нелинейным диэлектрическим покрытием (рис. 1) будем анализировать на основе полученных выше решений (2)–(3), но переписанных в исходную систему переменных t и z :

$$E_+(z, t) = E_+^{(0)}(t - z) + G \left\{ E_{+0}^{(1)}(t - z) - \frac{\partial}{\partial t} \left[(E_+^{(0)}(t - z))^3 (z - z_0) + \frac{3}{2} (E_+^{(0)}(t - z))^2 \int_{t-z+2z_0}^{t+z} E_-^{(0)}(\xi) d\xi + \right. \right.$$

$$\left. \left. + \frac{3}{2} (E_+^{(0)}(t - z)) \int_{t-z+2z_0}^{t+z} (E_-^{(0)}(\xi))^2 d\xi \right] \right\},$$

$$E_-(z, t) = E_-^{(0)}(t + z) + G \left\{ E_{-0}^{(1)}(t + z) + \frac{\partial}{\partial t} \left[(E_-^{(0)}(t + z))^3 (z - z_0) - \frac{3}{2} (E_-^{(0)}(t + z))^2 \int_{t+z-2z_0}^{t-z} E_+^{(0)}(\tau) d\tau - \right. \right.$$

$$\left. \left. - \frac{3}{2} (E_-^{(0)}(t + z)) \int_{t+z-2z_0}^{t-z} (E_+^{(0)}(\tau))^2 d\tau \right] \right\},$$

где $E_{+0}^{(1)} = E_+^{(1)}(z_0, t)$, $E_{-0}^{(1)} = E_-^{(1)}(z_0, t)$. Далее для удобства выбираем $z_0 = 0$.

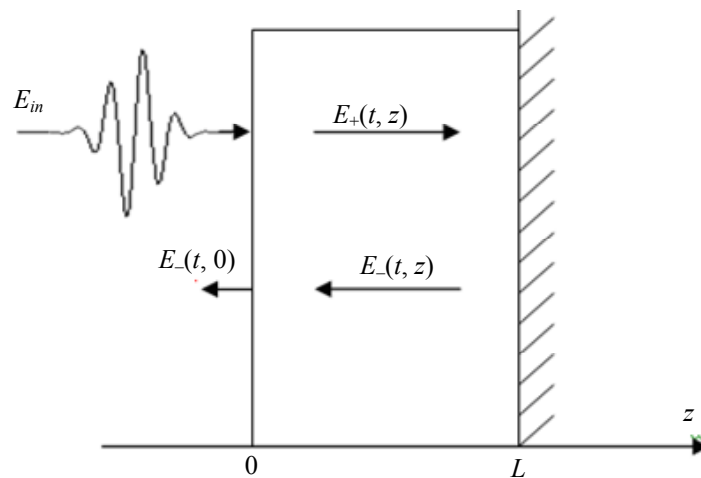


Рис. 1. Взаимодействие встречных световых волн в нелинейном диэлектрическом слое, нанесенном на металлическое зеркало

Временную структуру световой волны на входе в нелинейную среду (сразу за поверхностью слоя диэлектрика при $z = +0$) будем полагать известной:

$$E_+^{(0)}(0, t) \equiv E_{\text{вх}}(t),$$

т.е. не обсуждаем задачу нелинейного отражения от диэлектрической среды. В рассматриваемом случае естественно считать $E_{+0}^{(1)}(t) = 0$.

Искомой величиной полагаем поле $E_-(0, t) = E_-^{(0)}(t) + GE_-^{(1)}(t)$ волны, возвращенной от металлического зеркала к выходной поверхности диэлектрика ($z = +0$). Считая на металлическом зеркале (с координатой $z = L$) выполняющимся равенство

$$E_+(L, t) = -E_-(L, t),$$

получаем соотношение, связывающее параметры входящего в структуру диэлектрик–металлическое зеркало излучения и отраженного от нее излучения:

$$\begin{aligned} E_+^{(0)}(t-L) + G \left\{ E_{+0}^{(1)}(t-L) - \frac{\partial}{\partial t} \left[\left(E_+^{(0)}(t-L) \right)^3 \cdot z + \frac{3}{2} \left(E_+^{(0)}(t-L) \right)^2 \int_{t-L}^{t+L} E_-^{(0)}(\xi) d\xi + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{3}{2} \left(E_+^{(0)}(t-L) \right) \int_{t-L}^{t+L} \left(E_-^{(0)}(\xi) \right)^2 d\xi \right] \right\} = \\ = -E_-^{(0)}(t+L) - G \left\{ E_{-0}^{(1)}(t+L) + \frac{\partial}{\partial t} \left[\left(E_-^{(0)}(t+L) \right)^3 \cdot z - \frac{3}{2} \left(E_-^{(0)}(t+L) \right)^2 \int_{t-L}^{t+L} E_+^{(0)}(\tau) d\tau - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{3}{2} \left(E_-^{(0)}(t+L) \right) \int_{t-L}^{t+L} \left(E_+^{(0)}(\tau) \right)^2 d\tau \right] \right\}, \end{aligned}$$

которое несложно решить методом итераций. В «нулевой» итерации (диэлектрик рассматривается как линейная среда) на границе $z = L$ получаем

$$E_-^{(0)}(t+L) = -E_{\text{in}}(t-L). \quad (4)$$

Это означает, что на выходе из диэлектрика на границе $z = +0$

$$E_-^{(0)}(0, t) = -E_{\text{in}}(t-2L). \quad (5)$$

Из следующей итерации, учитывающей нелинейность оптической среды, вытекает соотношение

$$E_{-0}^{(1)}(t+L) = \frac{\partial}{\partial t} \left\{ 2L \frac{\partial}{\partial t} E_{\text{in}}^3(t-L) - \frac{3}{2} E_{\text{in}}^2(t-L) \left[\int_{t-3L}^{t-L} E_{\text{in}}(t') dt' - \int_{t-L}^{t+L} E_{\text{in}}(t') dt' \right] + \right. \\ \left. - \frac{3}{2} E_{\text{in}}(t-L) \int_{t-3L}^{t-L} E_{\text{in}}^2(t') dt' - \int_{t-L}^{t+L} E_{\text{in}}^2(t') dt' \right\}. \quad (6)$$

Из формул (4)–(6) несложно получить общее выражение для поля волны, отраженной от металлического зеркала с нелинейным диэлектрическим покрытием:

$$E_-(0, \tilde{t}) = -E_{\text{in}}(\tilde{t}) + G \left\{ 2L \frac{\partial}{\partial t} \left[E_{\text{in}}^3(\tilde{t}) \right] - \frac{3}{2} \frac{\partial}{\partial t} \left[E_{\text{in}}^2(\tilde{t}) \left(\int_{\tilde{t}-2L}^{\tilde{t}} E_{\text{in}}(t') dt' - \int_{\tilde{t}}^{\tilde{t}+2L} E_{\text{in}}(t') dt' \right) + \right. \right. \\ \left. \left. E_{\text{in}}(\tilde{t}) \left(\int_{\tilde{t}-2L}^{\tilde{t}} E_{\text{in}}^2(t') dt' - \int_{\tilde{t}}^{\tilde{t}+2L} E_{\text{in}}^2(t') dt' \right) \right] \right\}. \quad (7)$$

В соотношении (7) второе слагаемое в правой части учитывает нелинейность среды и характеризует совокупное действие эффектов самовоздействия светового импульса, распространяющегося в нелинейной диэлектрической среде, и взаимодействия импульса с отраженным от зеркала излучением.

На рис. 2 приведен результат численного моделирования выражения (7) при $L = 0,4$; $G = 0,05$ для входного импульса вида

$$E_{\text{in}}(t) = E^{(0)}(t) = E_0 \exp\left(-\frac{t^2}{t_0^2}\right) \sin(2\pi t), \quad (8)$$

где E_0 – исходная амплитуда импульса; $t_0 = \tau_0/T_c$ – нормированная длительность импульса; τ_0 – длительность импульса [фс]; T_c – его центральный период, а также модули спектров исходной (input) и отраженной (reflected) волн, рассчитанные при помощи преобразования Фурье по формуле $F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} E(t) e^{-i\omega t} dt$.

Из рис. 2 видно, что выражение (7) описывает генерацию излучения на утроенных частотах и уширение спектра на основной частоте. Для малых толщин диэлектрического покрытия эффект генерации утроенных частот обусловлен, в первую очередь, взаимодействием встречных импульсов в рассматриваемой структуре, а не самовоздействием волны в ней.

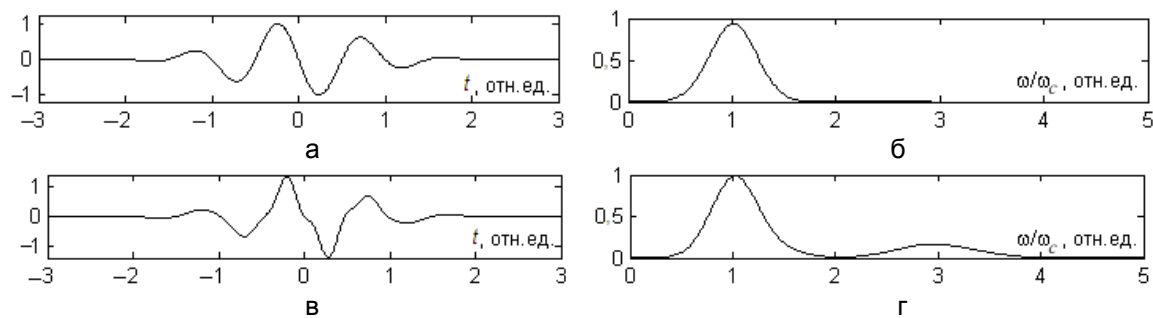


Рис. 2. Временная структура поля падающего на структуру импульса $E_{in}(t)$ (а) и его спектр $|F_{input}(\omega)|$ (б) при $\tau_0 = 1$, $E_0 = 1,06$; временная структура поля волны, возвращенной к поверхности диэлектрика $E_-(0,t)$ (в) и ее спектр $|F_{reflected}(\omega)|$ (г), где ω_c – центральная частота излучения импульса (8)

Проанализируем эффективность генерации излучения на новых частотах. Определим эффективность как отношение энергии излучения, сгенерированного на этих частотах $W_{3\omega} = 2 \int_{2\omega_c}^{\infty} \Delta F(\omega) d\omega$, где $\Delta F(\omega) = |F_{reflected}(\omega)|^2 - |F_{input}(\omega)|^2$ – изменение спектра отраженного от структуры излучения за счет нелинейности к энергии импульса на входе в структуру, $W_0 = \int_{-\infty}^{\infty} (E_{in}(t))^2 dt$. На рис. 3 представлены зависимости данного отношения от толщины слоя диэлектрика (а) и от длительности входного излучения (б).

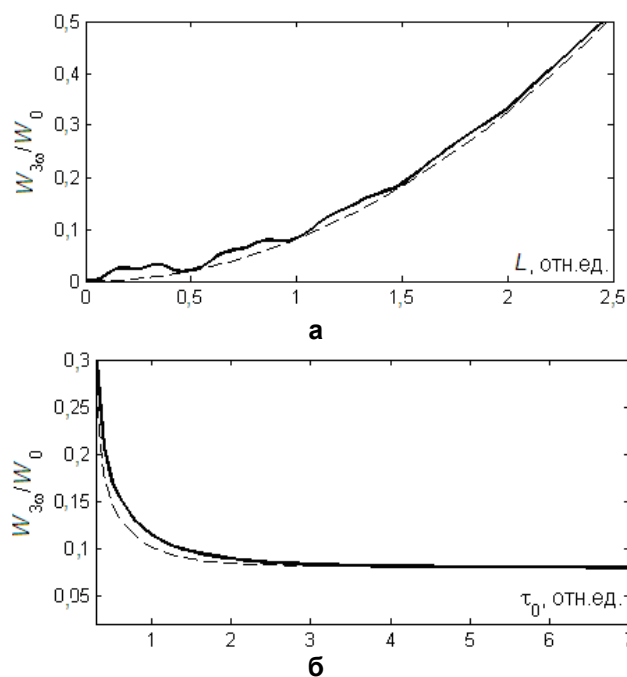


Рис. 3. Отношение энергии излучения утроенных частот к энергии исходного импульса в зависимости от размеров среды при $\tau_0 = 3$ (а) и длительности падающего на структуру импульса при толщине диэлектрического слоя $L = 3$ (б). Пунктиром показаны результаты расчета, когда в $|F_{reflected}(\omega)|$ не учитываются нелинейные слагаемые, соответствующие взаимодействию противоположно-распространяющихся волн.

Из рис. 3 видно, что при отражении импульсов из малого числа колебаний от металлического зеркала с прозрачным диэлектрическим слоем в результате взаимодействия импульсов в диэлектрическом слое при любых его толщинах происходит генерация излучения утроенных частот, отношение энергии которого к энергии падающего на зеркало импульса увеличивается при уменьшении числа колебаний в нем. При уменьшении толщины нелинейной среды зависимость отношения энергии излучения на утроенных частотах к энергии исходного импульса носит нелинейный характер. При больших толщинах отношение энергии излучения утроенных частот к энергии отражаемого импульса определяется преимуще-

ственно самовоздействием излучения в слое диэлектрика, вклад нелинейных слагаемых, соответствующих взаимодействию противоположно распространяющихся волн, становится постоянным и определяется только энергией входного импульса и его длительностью.

Заключение

В настоящей работе выведено аналитическое выражение, описывающее зависимость параметров поля излучения, отраженного от металлического зеркала с прозрачным нелинейным диэлектрическим слоем, от параметров поля падающей на зеркало световой волны из малого числа колебаний и характеристик диэлектрического слоя. Показано, что при отражении импульсов из малого числа колебаний от металлического зеркала с прозрачным диэлектрическим слоем в результате взаимодействия импульсов в диэлектрическом слое при любых его толщинах происходит генерация излучения утроенных частот, отношение энергии которого к энергии падающего на зеркало импульса увеличивается при уменьшении числа колебаний в нем.

Работа поддержана грантами ГК №16.740.11.0459 и РФФИ 11-02-01346-а.

Литература

1. Козлов С.А., Сазонов С.В. Нелинейное распространение импульсов длительностью в несколько колебаний светового поля в диэлектрических средах // ЖЭТФ. – 1997. – Т. 111. – № 2. – С. 404–418.
2. Nazarkin A., Korn G. Raman self-conversion of femtosecond laser pulses and generation of single-cycle radiation // Phys. Rev. A. – 1998. – V. 58. – № 1. – P. R61–R64.
3. Изъюров С.А., Козлов С.А. Динамика пространственного спектра световой волны при ее самофокусировке в нелинейной среде // Письма в ЖЭТФ. – 2000. – Т. 71. – № 11. – С. 666–670.
4. Казанцева Е.В., Маймистов А.И. Распространение предельно коротких импульсов в нерезонансной квадратично-нелинейной среде // Квантовая электроника. – 2000. – Т. 30. – № 7. – С. 623–628.
5. Shpolyanskiy Y.A., Belov D.L., Bakhtin M.A., Kozlov S.A. Analytic study of continuum spectrum pulse dynamics in optical waveguides // Applied Physics B. – 2003. – V. 77. – № 2–3. – P. 349–356.
6. Сазонов С.В., Халяпин В.А. О влиянии дифракции на нелинейное распространение оптических импульсов длительностью в несколько колебаний // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34. – № 11. – С. 1057–1063.
7. Мохнатова О.А., Козлов С.А. Нелинейное отражение фемтосекундного спектрального суперконтинуума // ЖЭТФ. – 2008. – Т. 133. – № 2. – С. 260–270.
8. Белов Д.Л., Козлов С.А., Шполянский Ю.А. О самосжатии спектрального суперконтинуума // Известия РАН, серия физическая. – 2005. – Т. 69. – № 8. – С. 1128–1130.
9. Berkovsky A.N., Kozlov S.A., Shpolyanskiy Y.A. Self-focusing of few cycle light pulses in dielectric media // Physical Review A 72. – 2005. – P. 043821 (9 pages).
10. Бахтин М.А., Козлов С.А. Формирование последовательности сверхкоротких сигналов при столкновении импульсов из малого числа колебаний светового поля в нелинейных оптических средах // Оптика и спектроскопия. – 2005. – Т. 98. – № 3. – С. 425–430.
11. Буяновская Е.М., Козлов С.А. Динамика полей встречных световых импульсов из малого числа колебаний в нелинейных диэлектрических средах // Письма в ЖЭТФ. – 2007. – Т. 86. – № 5–6. – С. 349–353.
12. Brabec Th., Krausz F. Intense few-cycle laser fields: Frontiers of nonlinear optics // Rev. Mod. Phys. 2000. – V. 72. – № 2. – P. 545–591.
13. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
14. Буяновская Е.М., Козлов С.А. Взаимодействие встречных световых импульсов из малого числа колебаний в нелинейных диэлектрических средах и генерация излучения на комбинационных частотах в этом процессе // Оптика и спектроскопия. – 2011. – Т. 111. – № 2. – С. 325–332.
15. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. – М.: Наука, 1977. – 831 с.

Буяновская Елизавета Михайловна	– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, младший научный сотрудник, lee.buyanovskaya@gmail.com
Козлов Сергей Аркадьевич	– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, kozlov@mail.ifmo.ru
Сухоруков Андрей Анатольевич	– Австралийский национальный университет, кандидат физ.-мат. наук, доцент, ans124@physics.anu.edu.au
Кившарь Юрий Семенович	– Австралийский национальный университет, академик Австралийской академии наук, профессор, ysk@physics.anu.edu.au

УДК 53.084.85

СИСТЕМА НАКАЧКИ ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ДЛЯ ИСТОЧНИКА НЕПРЕРЫВНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

А.В. Веденеев, Н.В. Ионина, В.В. Орлов, А.С. Рохмин, Е.А.Седых, М.К. Ходзицкий, С.А. Козлов

Создана система накачки инфракрасным излучением для фотопроводящей антенны – источника непрерывного терагерцового излучения, на основе смешения частот излучения двух полупроводниковых лазеров полуторамикронного диапазона. Данная система позволяет расширить рабочий диапазон перестройки терагерцовых спектрометров до 18 ТГц с шагом 0,125 ТГц. Дополнительно было разработано оригинальное программное обеспечение, позволяющее использовать систему накачки антенны в качестве прецизионного инфракрасного спектрометра в диапазоне длин волн 1450–1590 нм.

Ключевые слова: система накачки, терагерцовое излучение, инфракрасная спектроскопия.

Введение

Интерес к терагерцовой (ТГц) области электромагнитного спектра (0,1–10 ТГц) связан в значительной степени с характерными особенностями самого излучения, которые обуславливают возможность его эффективного применения в спектроскопии, медицине, биологии, промышленном техническом контроле, сфере обеспечения безопасности, экологическом контроле. Так как ТГц диапазон частот находится между оптическим (инфракрасным) и радиофизическим (миллиметровым) диапазонами, то его излучение характеризуется достаточно короткой длиной волны, но при этом слабо поглощается во многих средах, не прозрачных для видимого излучения. Эта особенность позволяет реализовывать технологии промышленного контроля изделий. Поскольку при этом ТГц излучение не является ионизирующим, такие технологии могут быть и достаточно безопасными для людей. С этой точки зрения применение ТГц излучения в определенных медицинских приложениях потенциально предпочтительнее широко используемого рентгеновского, обладающего ионизирующими свойствами, разрушительно действующими на живые ткани. Важным применением ТГц спектроскопии может быть обнаружение вредных и запрещенных к применению веществ по спектральным сигнатурам и контроль окружающей среды [1, 2].

Однако представленные в публикациях лабораторные макеты спектрометров для ТГц области спектра электромагнитного излучения, а также присутствующие на рынке коммерческие образцы таких приборов позволяют осуществить перестройку частоты лишь в диапазоне от 0,1 до 3–3,5 ТГц [3–5]. При этом сканирование частоты в этом диапазоне может производиться с шагом до 1 ТГц [6, 7].

В настоящей работе представлена система накачки инфракрасным (ИК) излучением для фотопроводящей антенны – источника непрерывного ТГц излучения, на основе смешения частот излучения двух полупроводниковых лазеров полуторамикронного диапазона, позволяющая расширить потенциальный диапазон перестройки частоты ТГц излучения до 18 ТГц и обеспечивающая шаг перестройки до 0,125 ТГц. Реальный диапазон перестройки будет ограничиваться резонансным контуром используемой фотопроводящей антенны. Для выпускаемых в настоящее время фотопроводящих антенн этот диапазон 0,1–5 ТГц.

Кроме того, для такой системы накачки разработано специальное программное обеспечение, позволяющее в автоматизированном режиме управлять разностными частотами ИК-лазеров, а также использовать систему в качестве прецизионного ИК-спектрометра в диапазоне длин волн 1450–1590 нм. Также была обеспечена фокусировка ИК-излучения в пятно диаметром 20 мкм при использовании стандартных оптических элементов.

Оптическая схема лабораторного макета

Одним из наиболее часто используемых в последнее время способов генерации непрерывного излучения ТГц диапазона частот является облучение фотопроводящей антенны, на которую подано напряжение смещения, двумя источниками видимого или ИК-диапазона с близкими длинами волн. При сложении полей таких источников на фотопроводящей антенне появляется составляющая фототока с частотой, соответствующей разности этих длин волн, и находящаяся уже в ТГц частотном диапазоне. При этом необходимо решить задачи эффективной фокусировки излучения в плоскости фотопроводящей антенны в пятно диаметром 5–10 мкм, обеспечив плотность мощности до десятков кВт/см² и перестройки длины волны лазеров в требуемом диапазоне. В нашей работе для реализации системы накачки ТГц источника излучения применены перестраиваемые в широком диапазоне частот полупроводниковые лазеры Фабри–Перо с полуторамикронными диапазонами для обеспечения полосы разностных частот до 18 ТГц, а также возможности использования существующих развитых технологий оптоволоконной связи. Для фокусировки излучения использовались также стандартные промышленные оптические элементы (микрообъективы, линзы). Фотография и схема системы накачки для ТГц источника излучения приведены соответственно на рис. 1 и рис. 2.

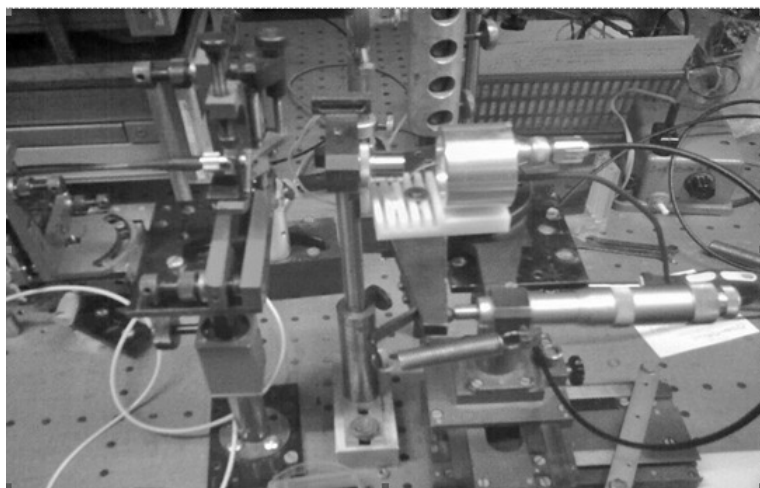


Рис. 1. Фотография лабораторного макета

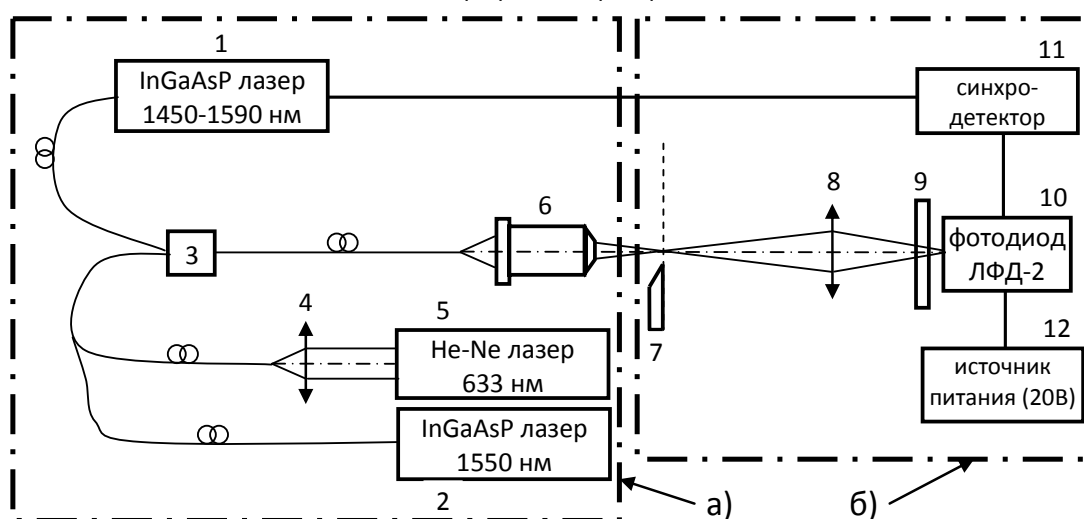


Рис. 2. Система накачки для ТГц источника излучения с блоком контроля параметров: а) система накачки ТГц источника излучения; б) блок контроля параметров системы накачки:

1, 2 – полупроводниковые перестраиваемые лазеры (1450–1590 нм); 3 – оптоволоконный разветвитель; 4 – фокусирующая линза; 5 – He-Ne юстировочный лазер; 6 – система фокусировки ИК-излучения; 7 – непрозрачный экран – нож; 8 – коллективная линза; 9 – диффузный экран (диффузор); 10 – приемник излучения ЛФД-2; 11 – синхронный детектор SR830; 12 – источник постоянного напряжения

Излучение с волоконно-оптических выходов полупроводниковых ИК-лазеров 1, 2 с помощью волоконно-оптического разветвителя 3 подается на вход фокусирующей системы 6. Для юстировки в один из входных каналов волоконного разветвителя подается видимое излучение He-Ne лазера 5, с помощью которого юстируется фокусирующая система 6, располагающаяся на определенном расстоянии на выходе волоконного разветвителя. В качестве альтернативных рассматривались варианты фокусировки ИК-излучения одиночной линзой с фокусным расстоянием 10 мм, микрообъективом «ПЛАН 9×10». Для этих вариантов определялась плотность мощности излучения в перетяжке формируемого пучка, диаметр перетяжки, а также коэффициент пропускания фокусирующей системы. Для генерации ТГц излучения необходимо сфокусировать ИК-излучение, выходящее из оптического волокна, в зазор фотопроводящей антенны размером порядка $5 \times 10 \text{ мкм}^2$, пятно диаметром примерно 10 мкм. Для выбора наилучшего варианта фокусирующего объектива были измерены диаметры пятен, формируемых линзой с фокусным расстоянием 10 мм и микрообъективом «ПЛАН 9×0,20». Для измерения диаметра пятна был использован метод ножа [8]. Согласно этому методу, в поперечное сечение лазерного пучка вводилась диафрагма (нож), имеющая тонкий прямолинейный край, которая перекрывала часть пучка. Интенсивность другой части пучка, прошедшей мимо ножа, фокусировалась линзой на фотодиод, чувствительный к ИК-излучению. По измеренной зависимости интенсивности излучения от положения ножа находится распределение интенсивности в сечении пучка. В данном случае измерялся диаметр пятна излучения, который определялся как разность координаты положения ножа, где интенсивность излучения начинала возрастать, и координаты, где интенсивность достигала максимального значения и не изменялась при дальнейшем перемещении ножа. Устройство, реализующее метод «ножа», схематически показано на рис. 2.

Нож 7 устанавливался на поворотном столике, его перемещение в поперечном сечении пучка выполнялось в небольшом диапазоне углов поворота столика. Движение ножа происходило по окружности радиусом порядка 40 мм и длине дуги порядка 1 мм, поэтому траекторию движения можно с большой точностью аппроксимировать прямой линией. Поворот столика осуществлялся микрометрическим винтом. Положение ножа определяется по данным шкалы микрометрического винта, а величина перемещения ножа вычисляется с помощью выражения

$$L_n = L_{mb} \cdot R_n / R_{ст},$$

где L_n – перемещение ножа; L_{mb} – перемещение микрометрического винта; R_n и $R_{ст}$ – расстояния от центра вращения столика до края ножа и точки контакта столика с микрометрическим винтом соответственно.

Расположение ножа на поворотном столике позволяет увеличить точность перемещения ножа в $R_{ст}/R_n$ раз по сравнению с точностью перемещения 0,01 мм, обеспечиваемой непосредственно микрометрическим винтом. В данном случае точность перемещения ножа увеличилась в 3,45 раз и составила 0,0029 мм. Для юстировки установки использовалось излучение He-Ne лазера, выходящее из того же оптического волокна, что и ИК-излучение. Измеренные значения диаметров пятен ИК-излучения, сформированные линзой и микрообъективом, составили 0,165 и 0,02 мм соответственно. На рис. 3 представлена зависимость интенсивности излучения от положения ножа при формировании пятна микрообъективом. Было также измерено пропускание линзы и микрообъектива для длины волны излучения 1550 нм, которые составили 0,92 и 0,43 соответственно. Отсюда следует, что, несмотря на меньшее пропускание, микрообъектив обеспечивает намного большую концентрацию энергии ИК-излучения на антенне, чем линза, благодаря меньшему диаметру пятна излучения.

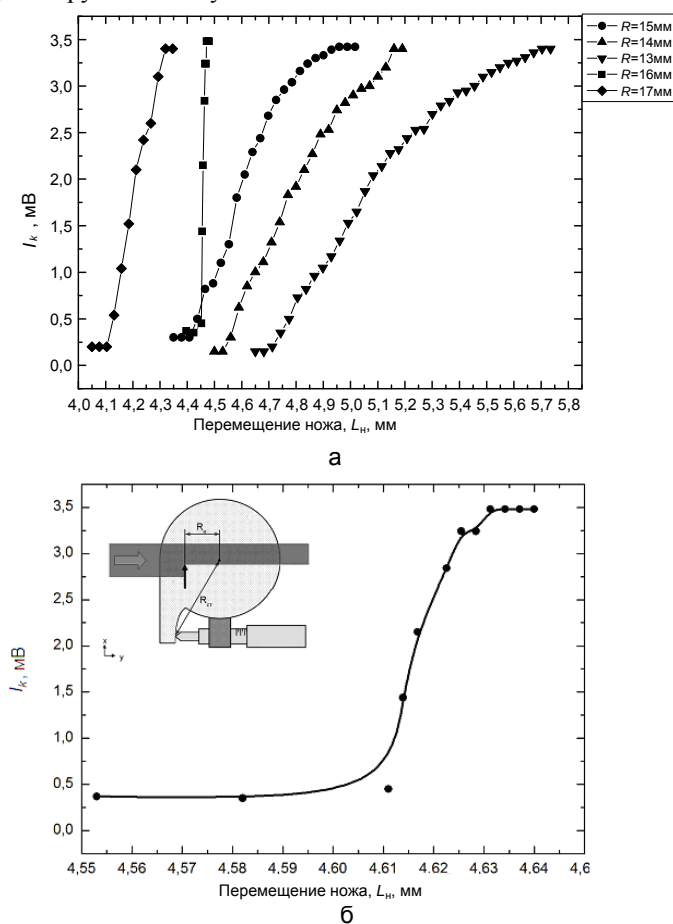


Рис. 3. Зависимость интенсивности излучения, прошедшего мимо ножа (I_k), от смещения ножа (L_n) (а) и схема устройства, перемещающего нож (на вкладке), для разных расстояний (R) от края объектива до ножа $R = 16$ мм (б)

Программное обеспечение

Блок-схема измерительной системы ИК-спектрометра приведена на рис. 4. В схеме был использован метод синхронного детектирования. Для синхронного детектирования использовался генератор опорного сигнала на частоте, равной частоте исследуемого сигнала. В данной схеме это выполняется путем фазовой привязки внутреннего генератора синхронного детектора SR 830 к сигналу от генератора внутренней модуляции лазера HP 8168F. SR 830 умножал исследуемый сигнал с фотодиода на опорный сигнал цифровым способом. Усиленный сигнал оцифровывается с помощью 16-битного аналого-

цифрового преобразователя (АЦП) с максимальной частотой дискретизации 256 кГц. Перед преобразователем стоял фильтр низких частот с максимальной частотой 102 кГц, который предотвращал искажения, вызванные конечной частотой дискретизации. Данный синхронный детектор может измерять сигналы порядка нескольких нановольт. Встроенный в него низкошумящий усилитель предназначен для усиления сигнала до уровня, оптимального при оцифровке сигнала с помощью АЦП, не увеличивая отношение сигнал/шум. Коэффициент аналогового усиления в синхронном детекторе может изменяться примерно от 7 до 1000. Суммарное усиление определяется чувствительностью, которая изменяется от 1 В до 2 нВ. Распределение усиления определяется динамическим резервом. Динамический резерв можно изменять в диапазоне 0–174 дБ. Постоянная времени, которая определяет эффективную ширину полосы фильтра низких частот, может изменяться от 10 мс до 30 с. Фильтр низких частот представляет собой обычный RC-фильтр с подавлением сигнала 6 дБ/октава. Генератор внутренней модуляции лазера HP 8168F перестраивается в диапазоне 250 Гц–300 кГц. Выходная мощность ИК-лазера регулируется в диапазоне 0,1–5,5 мВт (максимум на длине волны 1555 нм). Номинальный диапазон длин волн от 1450 нм до 1590 нм определяет ТГц диапазон излучения для фотопроводящей антенны от 0,1 до 18 ТГц. Минимальный шаг сканирования по длине волны для лазера HP 8168F равен 1 пм, соответственно шаг перестройки в ТГц диапазоне составляет 0,125 ТГц. Таким образом, управляемыми параметрами ИК-лазера являются частота модуляции, ИК-мощность, шаг сканирования, длина волны, а управляемыми параметрами синхронного детектора – постоянная времени, динамический резерв, фильтрация, чувствительность. «Мертвое время» (задержка) спектрометра составляет около 1 мс в течение каждого полупериода. Задержка необходима для исключения переходных процессов после включения или выключения мощности. Новое измерение начинается с установки новой длины волны и мощности, а также проверки выставленных значений за счет обратной связи. Обработка сигналов и общее управление работой прибора и синхронизация процессов измерения проводится с помощью микроконтроллера, который получает команды и пересылает измеренные данные в блок электроники.

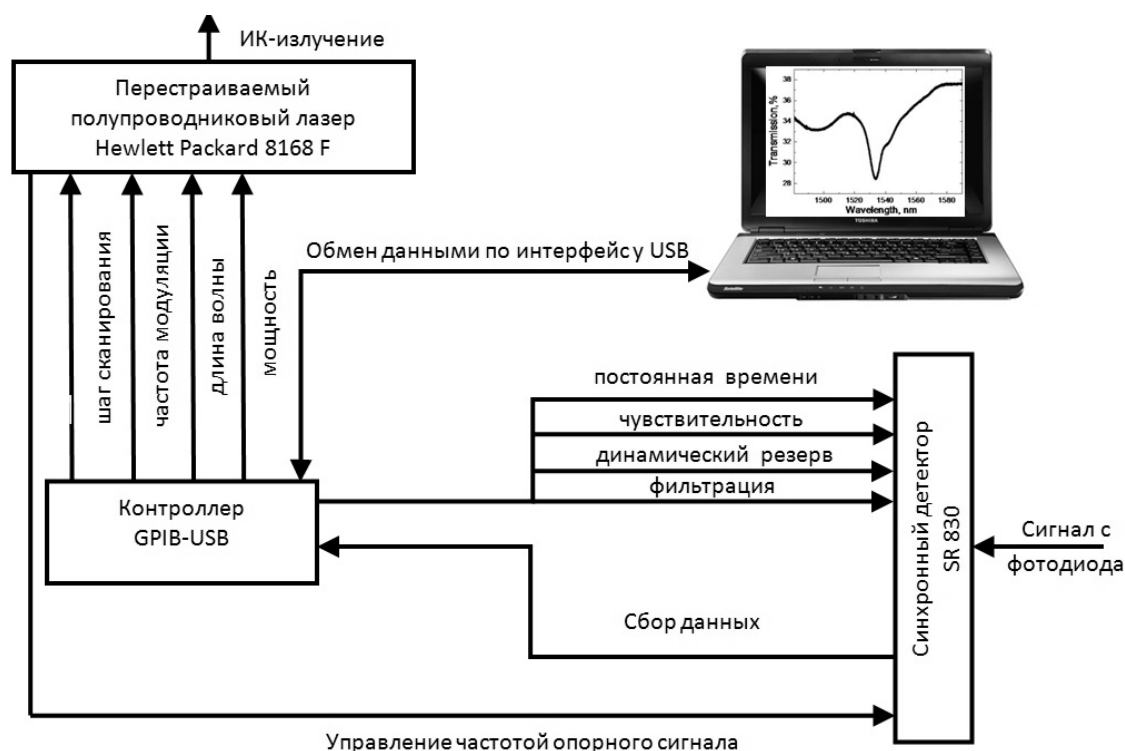


Рис. 4. Структурная схема основных узлов системы автоматизации эксперимента

При разработке программного обеспечения сопровождения спектрометра ставилась задача возложить на него следующие функции:

1. диалоговый режим работы с оператором;
2. управление плавным сканированием частоты ИК-излучения;
3. непрерывный контроль состояния изменения частоты;
4. статистическая обработка информации и ее архивация в удобной для пользователя форме;
5. оперативный контроль состояния элементов ИК-спектрометра.

Данное программное обеспечение управления системой накачки/спектрометром было реализовано на графическом языке LabView 8.5. Интерфейс программного обеспечения показан на рис. 5.

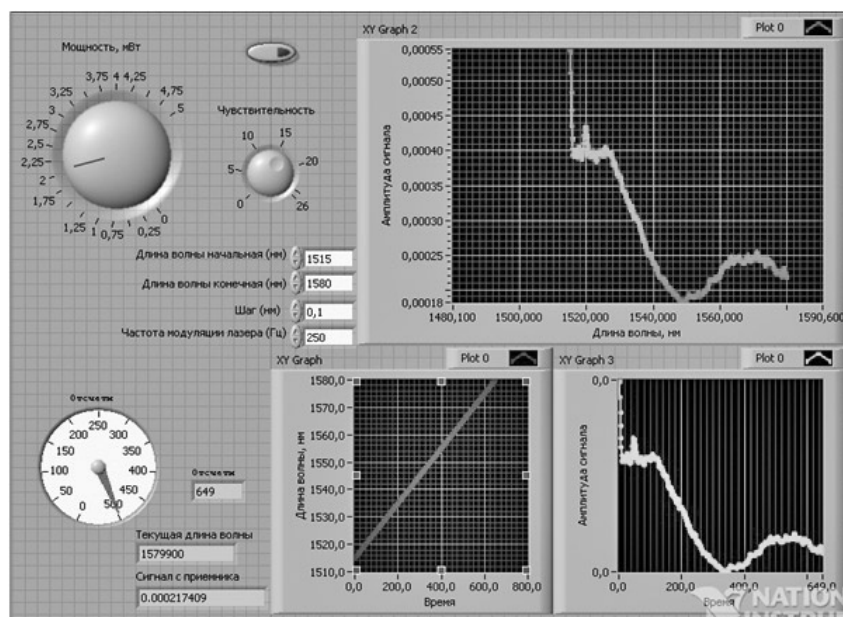


Рис. 5. Интерфейс программы управления системой накачки

Связь между элементами спектрометра и персональным компьютером осуществляется через GPIB-USB протокол обмена. При включении спектрометра производится начальная установка частоты ИК-лазера, значения мощности излучения, настройка частоты модуляции ИК-излучения, параметров синхродетектора, а также осуществляется контроль параметров излучения. Для измерения спектров пропускания достаточно ввести диапазон перестройки частоты, шаг сканирования и число импульсов накопления (усреднения). По мере накопления данных полученный спектр отображается на мониторе.

Работа поддержана грантом ФЦП Министерством образования и науки Российской Федерации (ГК №16.740.11.0459).

Заключение

В ходе проведенных исследований были получены следующие основные результаты:

1. создана система накачки ИК-излучением для фотопроводящей антенны – источника непрерывного ТГц излучения, на основе смещения частот излучения двух полупроводниковых лазеров полумикронного диапазона, позволяющая осуществлять перестройку в частотном диапазоне 0,1–18 ТГц с шагом 0,125 ТГц;
2. разработано программное обеспечение для управления системой накачки, обеспечивающее возможность использовать данную систему в качестве прецизионного ИК-спектрометра в диапазоне длин волн 1450–1590 нм;
3. обеспечена фокусировка ИК-излучения в пятно диаметром 20 мкм в плоскости фотопроводящей антенны при использовании стандартных оптических элементов.

Литература

1. Yun-Shik L. Principles of Terahertz Science and Technology. – Springer, 2009. – 341 p.
2. Беспалов В.Г., Городецкий А.А., Грачев Я.В., Козлов С.А., Новоселов Е.В. Импульсный терагерцовый рефлектометр // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2011. – № 1 (71). – С. 19–23.
3. Sartorius B., Stanze D., Gobel T. et al. Continuous Wave Terahertz System, based on 1.5 μm Telecom Technologies // Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. – 2012. – V. 33. – P. 405–417.
4. Preu S., Dohler G.H., Malzer S. et al. Tunable, continuous – wave Terahertz photomixer sources and applications // Journal of Applied Physics. – 2011. – V. 109. – P. 061301–57.
5. Ngatsuma T., Kaino A., Hisatake S. et al. Continuous Wave Terahertz Spectroscopy System Based on Photodiodes // PIERS Online. – 2010. – V. 6. – P. 390–394.
6. Wilk R. Continuous wave Terahertz spectrometer with coherent detection // Bulletin of the Polish Academy of Sciences. – 2010. – V. 58. – P. 713–716.
7. Wilk R. Continuous wave Terahertz spectrometer based on two DFB laser diodes // Optica Applicata. – 2010. – V. XL. – P. 119–127.
8. Suzaki Y., Tachibana A. Measurement of the mkm sized radius of Gaussian laser beam using the scanning knife-edge // Applied Optics. – 1975. – V. 14. – P. 2809–2810.

- | | |
|--|---|
| <i>Веденеев Алексей Владимирович</i> | – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, avedeneev.91@mail.ru |
| <i>Ионина Наталия Владимировна</i> | – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, ведущий инженер, shurch@yandex.ru |
| <i>Орлов Вячеслав Васильевич</i> | – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, orlov4v8v@yandex.ru |
| <i>Рохмин Алексей Сергеевич</i> | – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, ассистент, rokhnin@oi.ifmo.ru |
| <i>Седых Егор Александрович</i> | – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, manroom.harshrealm@gmail.com |
| <i>Ходзицкий Михаил Константинович</i> | – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, ассистент, khodzitskiy@yandex.ru |
| <i>Козлов Сергей Аркадьевич</i> | – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, kozlov@mail.ifmo.ru |

УДК 537.876.4

МАСКИРУЮЩЕЕ ПОКРЫТИЕ НА ОСНОВЕ СПИРАЛЬНЫХ РЕЗОНАТОРОВ

А.В. Возианова, М.К. Ходзицкий

Проведено исследование маскирующего покрытия на основе спиральных структур для скрытия объекта в сверхвысокочастотном диапазоне. Данное покрытие позволяет маскировать объект для ТЕ и ТМ поляризаций электромагнитного поля. Показаны результаты эксперимента и численного моделирования маскирующего покрытия с горизонтальным расположением спиралей относительно плоскости покрытия.

Ключевые слова: маскирующее покрытие, спиральные резонаторы, электромагнитное поле, метаматериалы, трансформационная оптика, невидимость.

Введение

В последние 5 лет в связи с активизацией исследования метаматериалов [1] произошел концептуальный и методологический прорыв в разработке реальных конструкций покрытий для маскировки объектов («шапок-невидимок»). Прорыв в области маскировки, в первую очередь, произошел благодаря работам Д. Пендри [2] и У. Леонхардта [3, 4], которые, используя трансформационную оптику, впервые открыли метод волнового обтекания для маскировки (невидимости) материальных тел – «клокинг». Разработанные на данный момент маскирующие покрытия можно классифицировать как устройства, отличающиеся по форме (2D и 3D) и по принципу работы: с использованием трансформационной оптики [2], плазмонные маскирующие устройства [5], устройства, использующие цилиндрический гофрированный рассеиватель [6], покрытия, работающие на аномальном резонансе [7] и т.д.

Наибольший интерес представляют устройства, разработанные на основе трансформационной оптики, так как они позволяют скрыть объект с любыми материальными параметрами и произвольной формы. Принцип работы маскирующих покрытий, разработанных с помощью трансформационной оптики, основан на сжатии объекта в точку в виртуальном пространстве [2] («сферическое маскирующее покрытие»), сжатии объекта в тонкую нить [8] («цилиндрическое маскирующее покрытие»), сжатии объекта в плоскость [9, 10] («ковровое маскирующее покрытие»), а также огибании объекта электромагнитной волной в реальном пространстве. К сожалению, разработанные на данный момент конструкции маскирующих покрытий позволяют частично скрыть объект для одной поляризации электромагнитной волны. Кроме того, в конструкции покрытия присутствуют экстремальные материальные параметры, которые реализуются наличием различных резонансных элементов.

В настоящей работе исследована модель электромагнитного цилиндрического маскирующего покрытия с горизонтальным расположением спиралей относительно плоскости покрытия. В отличие от работы [11], данная конструкция была оптимизирована по согласованию со свободным пространством и потерям в покрытии. Исследуемая структура облучалась электромагнитной волной с ТЕ-поляризацией для возбуждения магнитного диполя в одиночной спирали. Главными преимуществами данного устройства являются использование структурных единиц с одинаковыми геометрическими параметрами, маскировка объекта для ТЕ- (transverse electric) и ТМ- (transverse magnetic) поляризаций электромагнитных волн, идеальное согласование маскирующего покрытия с окружающим пространством. Предложенное маскирующее покрытие разработано с использованием принципа трансформационной оптики, которое позволяет скрыть объект в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне.

Расчет параметров спирали

В качестве структурной единицы маскирующего покрытия использовалась левосторонняя и правосторонняя канонические спирали (рис. 1). Каноническая спираль представляет собой разорванное кольцо с двумя отрезками проволоки на краях зазора, которые перпендикулярны плоскости кольца. При облучении электромагнитной волной спиралей (габаритные размеры которых во много раз меньше длины волны) в них индуцируются токи, которые генерируют электрический диполь (проволочки) и магнитный диполь (кольцо).



Рис. 1. Фотография элементарных структурных элементов (левосторонних и правосторонних спиральных резонаторов) маскирующего покрытия

Путем подбора параметров спирали (радиус кольца, радиус проволоки, длина электрического диполя) можно добиться одинаковых по амплитуде электрического и магнитного откликов от спиральных частиц на одной частоте.

Для реализации в эксперименте конструкции цилиндрического маскирующего покрытия, работающего для ТЕ- и ТМ-поляризаций, используются упрощенные эффективные материальные параметры, полученные с помощью трансформационной оптики [3]:

$$\epsilon_r = \mu_r = \frac{b}{b-a} \left(\frac{\rho-a}{\rho} \right)^2, \quad \epsilon_\phi = \mu_\phi = \epsilon_z = \mu_z = \frac{b}{b-a}, \quad (1)$$

где ϵ_r , μ_r , ϵ_ϕ , μ_ϕ , ϵ_z , μ_z – радиальные, угловые и азимутальные компоненты материальных параметров соответственно; a и b – внутренний и внешний радиусы маскирующего покрытия соответственно; r – радиальная координата. Как видно из равенства соответствующих компонент диэлектрической и магнитной проницаемости (1), конструкция маскирующего покрытия может работать одновременно для двух поляризаций. Для идеального согласования импеданса покрытия с импедансом свободного пространства требуется, чтобы угловые и азимутальные компоненты материальных параметров стремились к единице при увеличении внешнего радиуса маскирующего покрытия. Согласование импедансов маскировочного покрытия и окружающей среды по радиальным компонентам материальных параметров выполняется при условии равенства $\epsilon_r = \mu_r$. Так как в конструкции маскирующего покрытия используется набор спиральных частиц, необходимо получить эффективные относительные диэлектрическую и магнитную проницаемости маскирующего покрытия, которые рассчитываются по формуле Клаусиуса–Моссотти (2) для разреженной смеси [12]:

$$\epsilon_r = 1 + \frac{n}{\epsilon_0 \operatorname{Re} \left(\frac{1}{\alpha_{ee}} \right) - \frac{n}{3}}, \quad \mu_r = 1 + \frac{n}{\mu_0 \operatorname{Re} \left(\frac{1}{\alpha_{mm}} \right) - \frac{n}{3}}, \quad (2)$$

где α_{ee} и α_{mm} – электрическая и магнитная поляризуемости одиночных частиц соответственно; n – плотность на единицу объема. Для удовлетворения условия равенства материальных параметров маскирующего покрытия необходимо, чтобы выполнялось соотношение

$$\operatorname{Re} \frac{\alpha_{ee}}{\varepsilon_0} = \operatorname{Re} \frac{\alpha_{mm}}{\mu_0}. \quad (3)$$

Выражения (4) для осевых электрических и магнитных поляризуемостей спиралей были рассмотрены в работах [13, 14] и имеют вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{ee} = \left[\frac{\sin(kl)/k - l \cos(kl)}{1 - \cos(kl)} - \frac{1 - \cos(kl)}{k \sin(kl)} \frac{Z_L}{Z_W + Z_L} \right] \frac{4 \tan(kl/2)}{j \omega Z_W k}, \\ \alpha_{mm} = -2 \mu_0 R^3 \frac{J_1(kR)}{A_0} \left[1 + \frac{j}{Y_L + Y_W} \frac{1}{\pi \eta A_0} \right] \end{array} \right. \quad (4)$$

где Z_W , Z_L – импедансы, Y_W , Y_L – проводимости проволоки и кольца соответственно. Выражения для импедансов и проводимостей показаны в [13, 14].

Параметры спиралей могут быть получены из условия (3). Данное условие выполняется для параметров спиралей $R = 1,85$ мм, $l = 2,69$ мм, $r_0 = 0,1$ мм в частотном диапазоне 7,5–9,5 ГГц (рис. 2).

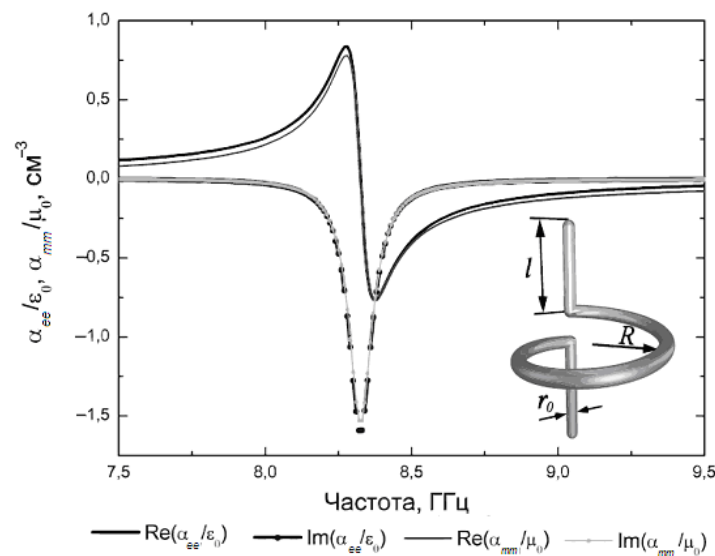


Рис. 2. Зависимость соотношений $\frac{\alpha_{ee}}{\varepsilon_0}$ и $\frac{\alpha_{mm}}{\mu_0}$ от частоты для оптимальных параметров спиралей
 $R = 1,85$ мм, $l = 2,69$ мм, $r_0 = 0,1$ мм

Следует отметить, что при выборе рабочей частоты маскирующего покрытия необходимо, чтобы величина $\operatorname{Re} \alpha_{ee}$ была большой по значению (достаточной для возбуждения спиралей), а $\operatorname{Im} \alpha_{ee}$ была минимальной (для уменьшения резонансных потерь).

Параметры маскирующего покрытия

В предложенном маскирующем покрытии радиальный градиент диэлектрической проницаемости осуществляется путем изменения плотности частиц в радиальном направлении. Так как эффективная относительная диэлектрическая проницаемость набора спиральных частиц равна радиальной компоненте диэлектрической проницаемости $\varepsilon_r = \varepsilon_r$, плотность частиц определяется по формуле

$$n = 3 \frac{\varepsilon_0}{\alpha_{ee}} \left(\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} \right). \quad (5)$$

Так как на границе внутреннего цилиндра маскирующего покрытия $\rho = a$ диэлектрическая проницаемость ε_r стремится к нулю, то α_{ee} становится отрицательной и большой по значению. Следовательно, плотность спиральных частиц может быть получена путем выбора значения $\operatorname{Re} \frac{\alpha_{ee}}{\varepsilon_0}$, достаточно-

го для возбуждения спиралей ($\text{Re} \frac{\alpha_{ee}}{\epsilon_0} = -0,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$), и рассчитана как функция от радиальной компоненты диэлектрической проницаемости. Конструкция маскирующего покрытия представляет собой круговую пластину с набором concentрических колец толщиной $d = 1 \text{ см}$. На каждом из колец расположены в произвольном порядке спиральные резонаторы, в середине пластины помещается объект, который при воздействии электромагнитного поля дипольной антенны на определенной частоте становится невидимым. Количество спиральных частиц в каждом из колец рассчитывается с учетом размеров элементарной ячейки и плотности спиральных частиц в каждом кольце. Для компенсации киральности каждый слой собирался из одинакового количества левосторонних и правосторонних спиралей. В данной конфигурации покрытия использовалось 8 слоев со следующим количеством спиралей в каждом слое: 30, 32, 30, 30, 28, 26, 24, 22, (рис. 3).

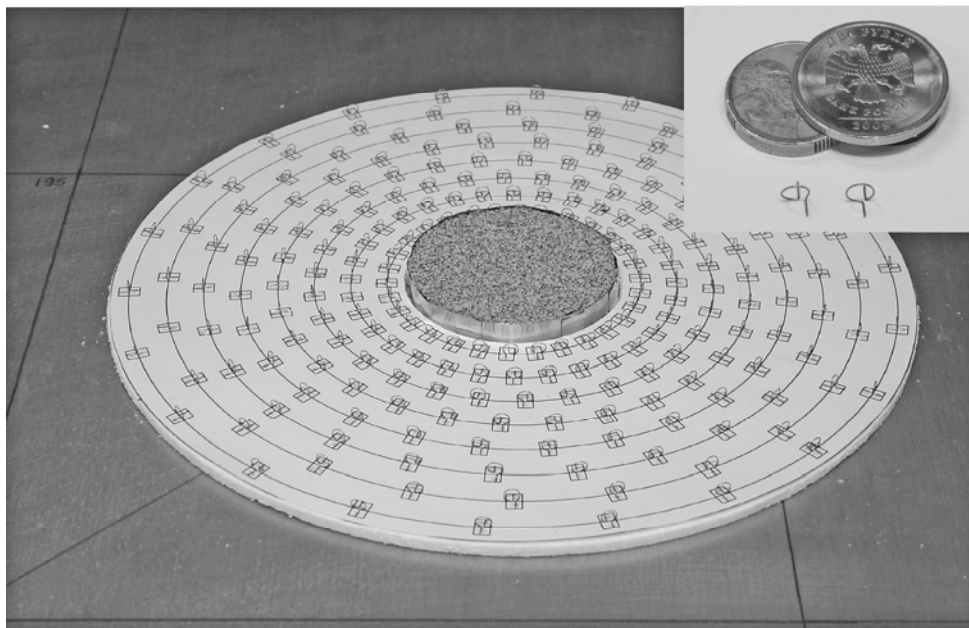


Рис. 3. Фотография конструкции маскирующего покрытия для горизонтальной конфигурации маскирующего покрытия, состоящего из спиральных структур

Экспериментальные данные и моделирование

Скрываемый объект представляет собой медный цилиндр диаметром 6 см и высотой 1 см. Цилиндр с маскирующим покрытием помещался в волноведущую структуру (две плоские металлические пластины) и возбуждался гауссовым пучком с плоским волновым фронтом. Нижняя пластина, на которой размещался объект и находился источник возбуждения, оставалась неподвижной, в то время как верхняя пластина с коаксиальной приемной антенной перемещалась, осуществляя, таким образом, процесс двумерного (2D) сканирования амплитуды и фазы электромагнитного поля. Края плоских пластин изолировались СВЧ поглощающим покрытием для предотвращения любых возможных отражений. Измерение 2D-распределения электрического поля для двух случаев (объект без маскирующего покрытия, объект с маскирующим покрытием) проводилось в частотном диапазоне 7–10 ГГц. Как видно из экспериментальных данных распределения амплитуды и фазы электрического поля, присутствие маскирующего покрытия позволяет восстановить (скорректировать) фазовый фронт и уменьшить тень за объектом (рис. 4).

Незначительное рассеивание цилиндром электромагнитных волн остается из-за небольших разбросов по параметрам спиралей при изготовлении. Наличие потерь в маскирующем покрытии из-за резонанса в спиральях ведет к некоторому снижению амплитуды электромагнитного поля за объектом.

Две исследуемые структуры (цилиндр с покрытием и цилиндр без покрытия) также были численно смоделированы с помощью коммерческого пакета 3D-моделирования электромагнитного поля CST Microwave Studio 2011. Расчетное распределение амплитуды электрического поля в сечении $y = 120 \text{ мм}$ (на расстоянии 10 мм от внешнего края покрытия) вдоль оси X вблизи рабочей частоты маскирующего покрытия показано на рис. 5. Как видно из рис. 5, уменьшается ширина теневой области за объектом и увеличивается амплитуда электрического поля

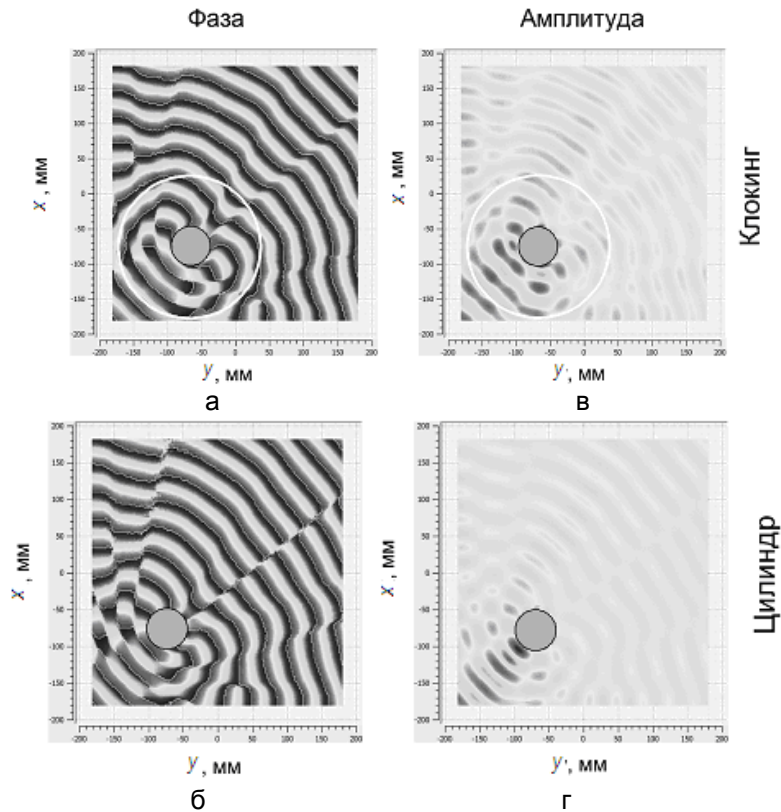


Рис. 4. Экспериментальное распределение амплитуды и фазы поля для горизонтального расположения спиралей (магнитный диполь) на частоте 8,49 ГГц: экспериментальные измерения для замаскированного цилиндра (а), (в); экспериментальные измерения для цилиндра без покрытия (б), (г)

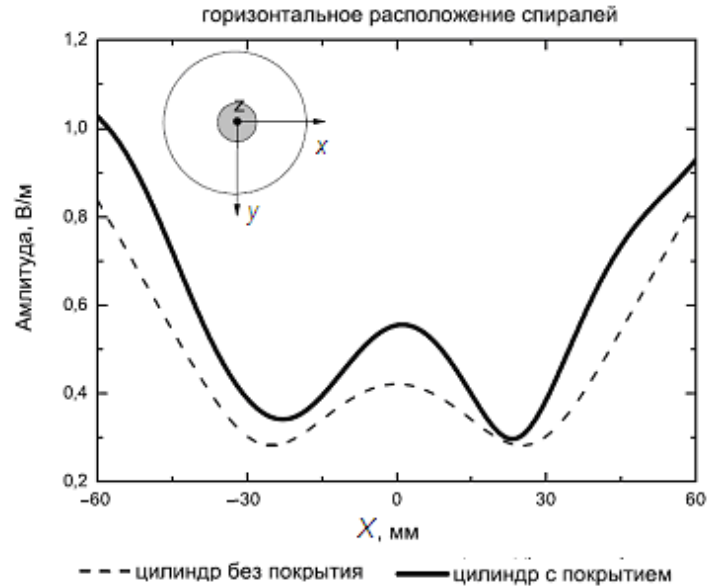


Рис. 5. Расчетное распределение амплитуды электрического поля вдоль оси X на расстоянии 10 мм от внешнего края покрытия (в сечении $y = 120$ мм) для горизонтального расположения спиралей: для замаскированного цилиндра (сплошная линия); для цилиндра без покрытия (пунктирная линия)

Закключение

В работе проведено исследование маскирующего покрытия на основе спиральных структур для скрытия объекта в СВЧ диапазоне. Была рассмотрена конфигурация покрытия, работающая для ТЕ- и ТМ-поляризаций. Экспериментальные и численные результаты показывают уменьшение тени за объектом и восстановление (коррекцию) волнового фронта в присутствии маскирующего покрытия. Результаты данного исследования будут стимулировать разработку универсальных перестраиваемых маскирующих покрытий, работающих для двух поляризаций электромагнитных волн.

Авторы выражают благодарность за возможность проведения исследований Австралийскому центру нелинейной физики, в лице руководителя центра, проф. Ю.С. Кившаря. Работа выполнена в рамках образовательной программы повышения квалификации и научных стажировок научно-педагогических работников, аспирантов и докторантов по направлению «Фотоника и оптоинформатика» на 2009–2013 годы.

Литература

1. Кившарь Ю.С., Орлов А.А. Перестраиваемые и нелинейные метаматериалы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 3 (79). – С. 1–10.
2. Pendry J.B., Schurig D. and D.R. Smith. Controlling electromagnetic fields // Science. – 2006. – V. 312. – P. 178–182.
3. Leonhardt U. Optical conformal mapping // Science. – 2006. – V. 312. – P. 1777–1780.
4. Leonhardt U. Notes on conformal invisibility devices // New Journal of Physics. – 2006. – V. 8. – P. 118 (16).
5. Silverinha Mario, Edwards Brian, Alu Andrea. Experimental verification of plasmonic cloaking at microwave frequencies with metamaterials // Phys. Rev. Lett. – 2009. – V. 103. – P. 153901 (4).
6. Luukkonen Olli, Tretyakov Sergei, Alitalo Pekka and Constantin Simovski. Broadband electromagnetic cloaking of long cylindrical objects // Phys. Rev. Lett. – 2009. – V. 103. – P. 109905.
7. McPhedran R.C., Nicorovici N.A. and G.W. Milton. Optical dielectric properties of partially resonant composites // Phys. Rev. B. – 2009. – V. 49. – P. 8479–8482.
8. Schurig D., Mock J.J., Justice B.J. et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies // Science. – 2006. – V. 314. – P. 977–980.
9. Mock J.J., Liu R., Ji C. Broadband ground-plane cloak // Science. – 2009. – V. 323. – P. 366–369.
10. Li J., Pendry J.B. Hiding under the carpet: A New Strategy for Cloaking // Phys. Rev. Lett. – 2008. – V. 101. – P. 203901(5).
11. Gonzalo R., Guven K., Saenz E. Electromagnetic cloaking with canonical spiral inclusions // New Journal of Physics. – 2010. – V. 10. – P. 115037+12.
12. Tretyakov S.A. Analytical Modeling in Applied Electromagnetics. – NY.: Artech House. – 272 p.
13. Simovski Constantin R., Tretyakov Sergei A., Mariotte Frederic. Analytical antenna model for chiral scatterers: Comparison with numerical and experimental data // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1996. – V. 44. – P. 1006–1014.
14. Maslovski Stanislav I., Tretyakov Sergei A. and P. Belov. An analytical model of metamaterials based on loaded wire dipoles // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2003. – V. 51. – № 10. – P. 2652–2658.

Возианова Анна Викторовна

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, vozianova@gmail.com

Ходзицкий Михаил Константинович

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, ассистент, khodzitskiy@yandex.ru

УДК 621.373.826

**ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ИЗЛУЧЕНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ В УСЛОВИЯХ
ПРОДОЛЬНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКИ****В.В. Назаров, Л.В. Хлопонин, В.Ю. Храмов, Н.А. Федоров**

Проведены исследования характеристик излучения генерации твердотельного Er:YLF-лазера с продольной диодной накачкой в моноимпульсном режиме и в режиме стационарной генерации в условиях неоднородного коэффициента усиления. Для обоих случаев предложена модель взаимодействия излучения накачки с активной средой. Для случая моноимпульсной генерации представлены основные пространственные и энергетические зависимости излучения генерации от параметров резонатора, а также от концентрации активатора в активном элементе. Для случая стационарной генерации приведены зависимости интенсивности основной моды от параметров излучения накачки и от значений коэффициента усиления слабого сигнала.

Ключевые слова: лазеры на эрбиевых кристаллах, пространственные характеристики лазерной генерации, продольная диодная накачка, стационарная генерация.

Введение

В последнее время, благодаря разработке эффективных мощных диодов, возрос интерес к разработке лазеров с диодной накачкой. Лазеры с продольной диодной накачкой обеспечивают высокую эффективность накачки и более высокие пространственные характеристики излучения генерации в сравнении с лазерами с поперечной накачкой. Такие преимущества лазеров с продольной накачкой, как высокие энергетическая эффективность и качество пучка излучения генерации, делают их пригодными для использования в различных медицинских приложениях, при разработке оптических сред для записи информации, цветных дисплеев, оптических методов тестирования. Для оптимизации процесса разработки таких лазеров одним из наиболее важных факторов, определяющих эффективность лазерной генерации, а также выходную мощность, является проблема пространственного перекрытия излучения накачки и пучка генерации, который определяется модовым составом генерируемого излучения. Влияние размеров пучков накачки и лазерного излучения на величину порога и эффективность лазерной генерации исследовано в ряде работ [1–3], в большинстве которых рассматривается усредненный по объему активного элемента размер пучка накачки. Несмотря на то, что данный подход дает возможность получить простые аналитические зависимости для проведения оптимизации, влияние ряда параметров, таких, как расходимость и положение перетяжки пучка накачки в объеме активного элемента, на энергетические и пространственные характеристики лазерной генерации, не может быть учтено в рамках таких простых моделей. В ряде работ определение интеграла перекрытия пучков накачки и излучения генерации рассматривается при помощи численных методик [4–5], в которых учитываются пространственные характеристики пучка накачки. Тем не менее, оценка интеграла перекрытия основывается на методах линейной аппроксимации вблизи порога и может быть признана корректной при внутрирезонаторных интенсивностях, пренебрежимо малых по сравнению с интенсивностями насыщения коэффициента усиления активной среды.

Моделирование взаимодействия излучения диодной накачки с активным элементом

Для исследования влияния неоднородности коэффициента усиления эрбиевых активных сред на характеристики лазерного излучения была разработана модель твердотельного лазера с продольной диодной накачкой. В основе этой модели лежит численная методика, позволяющая исследовать влияние параметров импульса накачки на распределение коэффициента усиления в объеме активной среды. Процесс взаимодействия импульса излучения накачки с эрбиевыми кристаллами основывается на численной модели, описывающей взаимодействие излучения импульса излучения накачки с резонансно поглощающей средой. Методика численного решения описывает распространение в протяженной поглощающей среде короткого импульса (рис. 1), представляющего собой однородную волну с плоским фронтом, распространяющуюся вдоль оси резонатора. Математически подобная задача сводится к решению нелинейной системы уравнений в частных производных для функций $I(z, t)$ и $U(z, t)$:

$$\begin{aligned}\frac{\partial I_p(z,t)}{\partial z} &= -(\sigma_{abs} \cdot N_1 - \sigma_{em} \cdot N_2) \cdot I_p - b \cdot I_p, \\ \frac{\partial N_2(z,t)}{\partial t} &= (\sigma_{abs} \cdot N_1 - \sigma_{em} \cdot N_2) \cdot I_p - \frac{N_2}{T_1} - 2 \cdot \gamma \cdot N_2^2, \\ N_2 &= N_s - N_1,\end{aligned}\quad (1)$$

где I – интенсивность излучения накачки; N_1, N_2 – населенность нижнего и верхнего уровней активной среды; N_s – концентрация активных центров; $\sigma_{abs}, \sigma_{em}$ – сечения поглощения и вынужденного излучения для излучения накачки; b – коэффициент нерезонансных потерь; T_1 – время жизни верхнего уровня; γ – коэффициент ап-конверсии, который в наших расчетах составлял 10^{-17} см³/с [6].

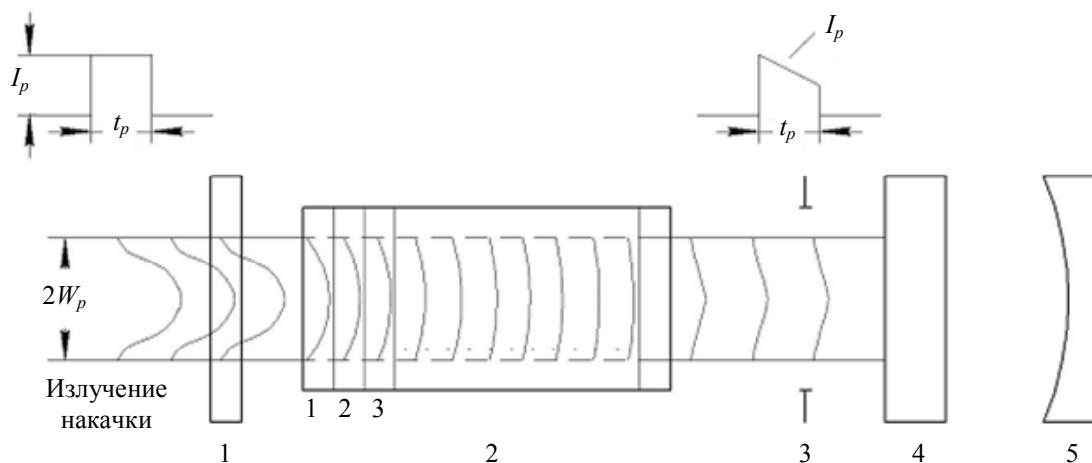


Рис. 1. Взаимодействие излучения диодной накачки с активным элементом:
1, 5 – зеркала резонатора; 2 – активный элемент; 3 – диафрагма; 4 – модулятор добротности

Начальные условия определяются заданием значений $U(z,0)$ и $I(z,0)$ в некоторый начальный момент времени $t = 0$, граничные условия – заданием прямоугольного импульса $I(0,t)$ на входе в усиливающую среду. Для численного решения уравнений при данных граничных и начальных условиях применялся метод конечных разностей. Достоинство данного способа заключается в его простоте. Однако его существенный недостаток – пропорциональность погрешности шагу сетки, поэтому обеспечение необходимой точности требует решения с достаточно малыми шагами, что значительно увеличивает машинное время вычислений.

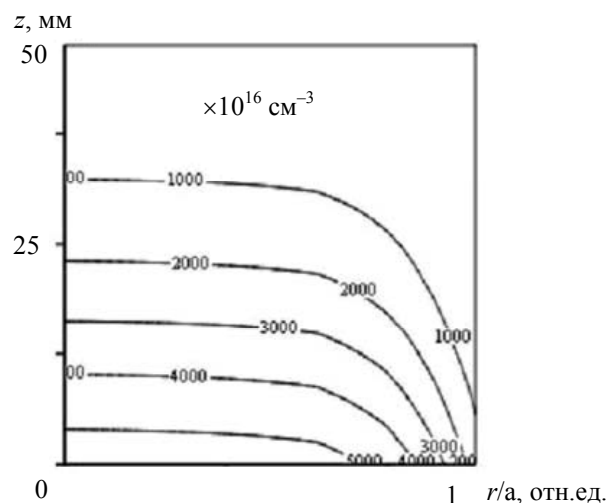


Рис. 2. Пространственное распределение населенности верхнего лазерного уровня для $c = 1$ ат.%

При помощи метода сеток был проведен анализ уравнений (1). Целью анализа было получить пространственное распределение инверсной населенности в активном элементе для различных значений

концентрации активатора. На рис. 2 представлено пространственное распределение инверсной населенности для концентрации активатора $c = 1$ ат.%. При проведении численного анализа были использованы следующие параметры: длина активного элемента $L = 50$ мм; коэффициент нерезонансных потерь $b = 1 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$; диаметр активного элемента 2 мм; радиус пучка накачки $w_p = 0,8$ мм; плотность мощности излучения накачки в центре активного элемента $I_0 = 1200 \text{ Вт/см}^2$. Расчет производился при длительности импульса накачки $t_0 = 2$ мс.

Согласно полученным результатам, при больших значениях концентрации активатора (больше 0,6–0,7 ат.%) поглощение излучения накачки происходит в первых слоях активного элемента. Таким образом, для больших концентраций коэффициент усиления среды определяется первыми слоями активного элемента.

Исследование пространственных характеристик излучения Er:YLF-лазера с продольной диодной накачкой

Для расчета пространственно-временной структуры поля используется модель лазерного резонатора, позволяющая исследовать процесс формирования поля лазерного излучения с учетом дифракции и усиления активной среды. Последовательность проведения расчета пространственно-временной структуры поля при моноимпульсном режиме генерации можно условно разделить на два этапа.

- На первом этапе находится стационарное распределение комплексной амплитуды в плоскости выходного зеркала с использованием стандартной процедуры Фокса–Ли. При расчете стационарного распределения комплексных амплитуд схема резонатора включает элементы, не содержащие усиливающей или поглощающей активной среды. В качестве начального распределения комплексной амплитуды выбирается распределение, имеющее гауссов поперечный профиль амплитуды и постоянную по сечению фазу.
- На втором этапе расчета полученное стационарное распределение комплексной амплитуды используется в качестве исходного при определении пространственно-временной структуры поля при моноимпульсном режиме генерации. В процесс расчета включаются также элементы, содержащие усиливающую активную среду, а также модулятор добротности, вносящий потери, зависящие от времени (рис. 1).

В результате численных исследований были определены энергетические и пространственные характеристики лазерного излучения в моноимпульсном режиме генерации.

На рис. 3 представлена зависимость энергии генерации моноимпульса от кривизны выходного зеркала для пяти значений концентраций. Максимальная энергия моноимпульса, полученная в данном резонаторе, достигается при концентрации активатора 0,3 ат.% (кривая 2) и кривизне выходного зеркала $0,4 \text{ м}^{-1}$. При этом же значении кривизны зеркала наблюдаются максимумы энергий для концентраций 0,1 ат.% (кривая 1), 1 ат.% (кривая 4) и 1,5 ат.% (кривая 5).

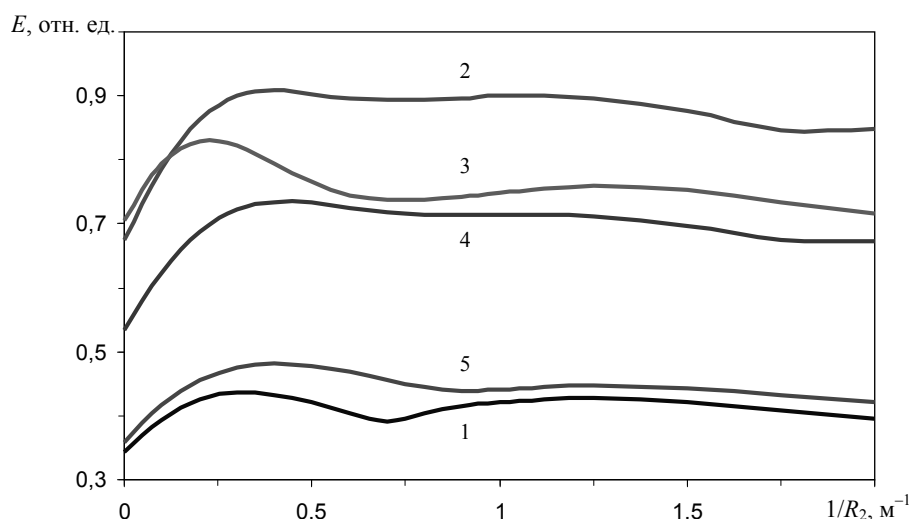


Рис. 3. Зависимость энергии моноимпульса от кривизны выходного зеркала. Концентрация активатора 0,1; 0,3; 0,5; 1; 1,5 ат.% (кривые 1–5 соответственно)

В ходе исследований были получены также пространственные характеристики излучения генерации (рис. 4). Оптимальное значение коэффициента отражения – 0,95. Качество пучка оценивалось по формуле

$$M^2 = \pi \cdot w_b \cdot \theta_d.$$

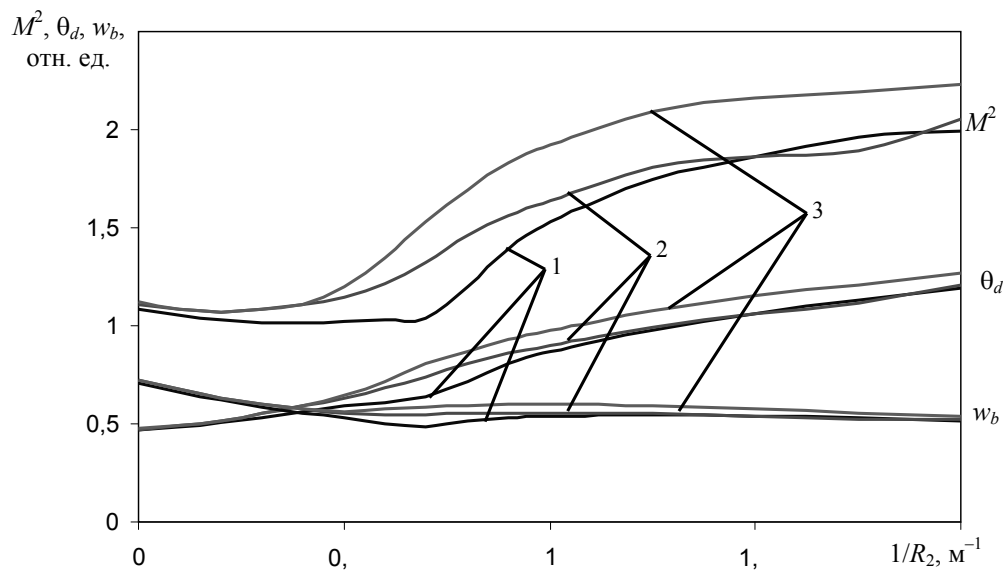


Рис. 4. Зависимость пространственных характеристик излучения генерации – радиуса пучка w_b , расходимости излучения θ_d и качества пучка M^2 – от кривизны выходного зеркала. Концентрация активатора 0,1; 0,3; 0,5 ат. % (кривые 1–3 соответственно)

При изменении кривизны происходит уменьшение характерного размера пучка излучения генерации и увеличение расходимости излучения соответственно. Тем не менее, при увеличении кривизны выходного зеркала ухудшается качество пучка. Это обусловлено возникновением генерации на дополнительных поперечных модах резонатора.

Моделирование стационарного режима генерации в условиях неоднородного коэффициента усиления

В ходе решения данной стационарной задачи активная среда представляется в виде тонкого слоя с заданным поперечным распределением коэффициента усиления слабого сигнала и стационарным распределением инверсии. Поперечный профиль коэффициента усиления будем описывать функцией Гаусса.

Моделирование проводилось для следующих геометрических параметров резонатора лазера: радиус апертуры $a = 1,1$ мм; длина оптической базы резонатора $L_{base} = 0,08$ м; длина волны излучения Er:YLF-лазера $\lambda = 2,81$ мкм; кривизна выходного зеркала $R_2 = 2$ м⁻¹; коэффициент отражения выходного зеркала $R_0 = 0,95$; толщина тонкого слоя активной среды $dz = 1$ мм; число Френеля $F = 5,4$ определено выражением

$$F = \frac{a^2}{\lambda \cdot L_{base}}.$$

Профиль коэффициента усиления в тонком слое активной среды задавался как

$$\alpha_i = \alpha_0 \cdot \exp \left(-2 \left(\frac{r_i}{w_p} \right)^2 \right),$$

где $r = \frac{r_i}{a}$ – радиальная координата; w_p – радиус пучка накачки; α_0 – коэффициент усиления в центре активного элемента, вычисленный из выражения для коэффициента усиления слабого сигнала

$$k_{ae} = \exp(\alpha_0 \cdot dz).$$

При каждом прохождении излучения через тонкий усиливающий слой активной среды приращение интенсивности составляло [7, 8]

$$\frac{\partial I^+}{I_s} = \frac{I^+}{I_s} \cdot \frac{\alpha_0}{1 + \frac{I^+}{I_s} + \frac{I^-}{I_s}} \cdot dz$$

для прямой волны (волны, идущей в прямом направлении) и, аналогично, I^- для обратной. Для удобства расчетов интенсивность излучения представлена в единицах интенсивности насыщения I/I_s . Интенсивность насыщения вычислялась как

$$I_s = \frac{h\nu}{\sigma_{\text{ген}} \cdot T_1},$$

где h – постоянная Планка; ν – частота излучения; $\sigma_{\text{ген}}$ – сечение эмиссии на длине волны генерации; T_1 – время жизни верхнего лазерного уровня. Для активной среды Er:YLF интенсивность насыщения составляет $1,9 \text{ кВт/см}^2$.

В ходе моделирования была получены зависимости интенсивности излучения основной моды от радиуса пучка накачки при различных значениях коэффициента усиления (рис. 5). Согласно полученным данным, при увеличении радиуса пучка накачки (при неизменной плотности мощности излучения накачки) интенсивность излучения основной моды возрастает до тех пор, пока распределение коэффициента усиления в тонком слое активного элемента не станет равномерным в пределах заданной апертуры.

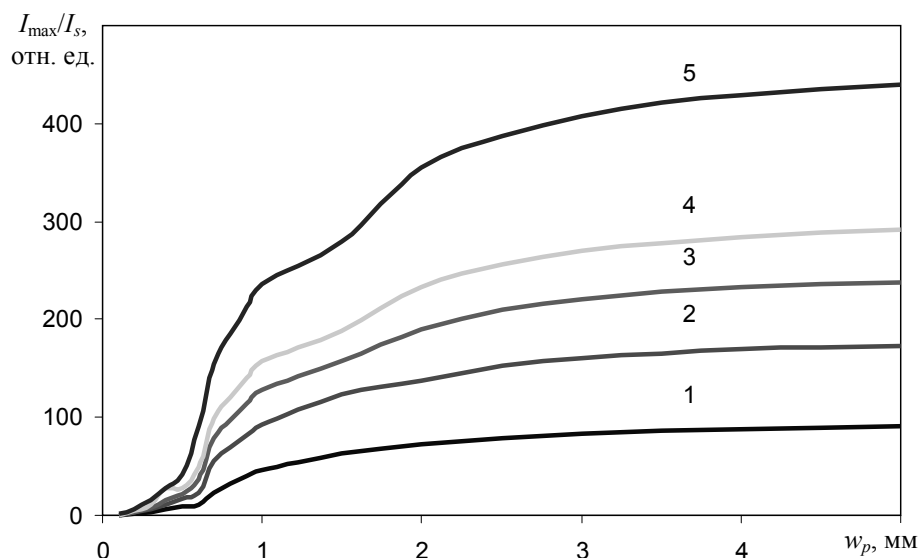


Рис. 5. Зависимость максимальной интенсивности основной моды в единицах интенсивности насыщения I_{max} / I_s от радиуса пучка накачки при значениях коэффициента усиления слабого сигнала $k_{oe} = 1,5; 2; 2,5; 3; 5$ (кривые 1–5 соответственно)

Заключение

В ходе данной работы была разработана модель продольной диодной накачки, позволяющая исследовать процессы формирования инверсной населенности в активном элементе с учетом пространственного неоднородного распределения излучения накачки. С помощью данной модели были получены зависимости населенности верхнего лазерного уровня от продольной и радиальной координаты.

Предложена модель резонатора моноимпульсного лазера с продольной диодной накачкой, позволяющая исследовать энергетические и пространственные характеристики излучения генерации: радиус пучка w_b , расхожимость излучения θ_d и качество пучка M^2 .

Предложена модель для исследования стационарного режима генерации твердотельного лазера в условиях продольной диодной накачки с учетом насыщения коэффициента усиления. В рамках данной модели были исследованы характеристики стационарного поля в резонаторе при различных коэффициентах усиления слабого сигнала k_{oe} , а также для ряда значений радиусов пучка накачки w_p .

Литература

1. Risk W.P. Modeling of longitudinally pumped solid state lasers exhibiting reabsorption losses // J. Opt. Soc. Am. B. – 1988. – V. 5. – P. 1412–1423.
2. Fan T.Y., Sanchez A. Pump source requirements for end pumped lasers // IEEE J. of Quantum Electronics (QE). – 1990. – V. 26. – № 2. – P. 311–316.
3. Laporta P., Brussard M. Design criteria for mode size optimization in diode pumped solid state lasers // IEEE J. of Quantum Electronics (QE). – 1991. – V. 27. – № 10. – P. 2319–2326.
4. Pfister C., Albers P., Weber H.P. Influence of spatial mode matching in end-pumped solid state lasers // Appl. Phys. B. – 1992. – V. 54. – № 1. – P. 83–88.
5. Chen Y.F., Liao T.S., Kao C.F. et al. Optimization of fiber coupled laser diode end pumped lasers // IEEE J. of Quantum Electronics (QE). – 1996. – V. 32. – № 11. – P. 2010–2016.

6. Ткачук А.М., Разумова И.К., Мирзаева А.А., Малышев А.В., Гапонцев В.П. Ур-конверсия и заселение возбужденных уровней иона эрбия в кристаллах LiY1-xErxF4 ($x=0.003-1$) при непрерывной накачке излучением InGaAs-лазерных диодов // Оптика и спектроскопия. – 2002. – Т. 92. – № 1. – С. 73–88.
7. Храмов В.Ю. Расчет элементов лазерных систем для информационных и технологических комплексов: Учебно-методическое пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 79 с.
8. Храмов В.Ю., Назаров В.В., Пушкарева А.Е., Сачков Д.Ю., Сидорова О.П. Моделирование взаимодействия излучения с веществом в задачах лазерной оптики: Учебно-методическое пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 111 с.

Назаров Вячеслав Валерьевич	– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, lab255@grv.ifmo.ru
Хлопонин Леонид Викторович	– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, l_khloponin@yahoo.com
Храмов Валерий Юрьевич	– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, khramov@grv.ifmo.ru
Федоров Никита Анатольевич	– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, nikifedorov@mail.ru

УДК 535:621.373.826.004.14

ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР, ФОРМИРУЕМЫХ В ПОЛЕ МИЛЛИСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСА GLASS: Yb, Er ЛАЗЕРА

А.В. Беликов, А.В. Скрипник, Н.А. Зулина

Впервые в эксперименте показана возможность нанесения аморфных углеродных покрытий на поверхности твердых тел с размерами отдельных структур порядка 20 нм, формируемых при воздействии излучения Glass: Yb, Er лазера на графитосодержащий композит. Представлены результаты исследования данных наноструктур средствами оптической и сканирующей электронной микроскопии, а также их влияния на микротвердость подложек из стали, дентина и эмали зуба.

Ключевые слова: углеродные наноструктуры, Glass: Yb, Er лазер, сканирующая электронная микроскопия.

Введение

Углеродные наноструктуры (фуллерены, нанотрубки, аморфные полимерные и алмазоподобные частицы), благодаря своим уникальным свойствам, представляют значительный интерес для промышленных и биомедицинских технологий. Одним из таких свойств является химическая инертность, что делает возможным использовать покрытия на основе углеродных наноматериалов для улучшения свойств металлических поверхностей [1]. Исследования оптических свойств наноразмерных углеродных покрытий для кремниевых подложек показали, что данные материалы способны поглощать ультрафиолетовое излучение, пропуская при этом излучение видимого диапазона [2]. Биосовместимость углеродных наноструктур чрезвычайно важна для применения подобных материалов в медицине [3]. В ряде биомедицинских технологий может быть востребована описанная в [4, 5] способность данных структур, нанесенных на поверхность материалов, снижать адгезионные свойства бактерий *Staphylococcus aureus* и *E. Coli* к этим материалам.

В настоящее время известно несколько методов получения наноразмерных структур на основе углерода, среди которых можно выделить термическое испарение графита, дуговой контактный разряд, сжигание и пиролиз углеродсодержащих соединений, а также лазерное испарение графита [6, 7]. Первые три метода сложны в реализации, энергоемки, а также отличаются высоким содержанием примесей в продукте (выход пыли из электродов при их перегреве, образование большого количества золы при сжигании). Этих недостатков можно избежать в процессе испарения графита под воздействием лазерного излучения, при этом режим работы лазера может быть как импульсным (например, в работе [8] длительность импульса лазерного излучения составляла ~3 нс), так и непрерывным [9].

Как было отмечено в [9], длительное лазерное воздействие способствует повышению температуры в приповерхностной области, что, благодаря эффекту «спекания» частиц, облегчает кластерообразование и процессы формирования наноразмерных углеродных структур. Кроме того, преимущество лазерной технологии по сравнению с технологиями, упомянутыми ранее, заключается в возможности использования в качестве исходного материала непроводящих углеродных материалов.

В настоящей работе изучены углеродные наноструктуры, созданные в результате воздействия на поверхность графитосодержащего композита излучения лазера на иттербий-эрбиевом стекле (Glass: Yb, Er) с длиной волны 1,54 мкм и длительностью импульса 30 ± 1 мс. Полученные наноструктуры исследованы методами оптической и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Сообщается о результатах исследования влияния этих наноструктур на микротвердость металла (сталь) и диэлектриков биологического происхождения (эмаль и дентин зуба человека).

Материал и метод. Описание эксперимента

Исходный материал для получения углеродных наноструктур (графитосодержащий композит) представлял собой графитовый стержень диаметром 2 мм и длиной 100 мм. Графитовый стержень состоял из графита и природной глины (~70%), основными химическими компонентами которой являются SiO_2 , Al_2O_3 и H_2O , а также в меньших количествах содержатся Fe_2O_3 , FeO , CaO , K_2O , CO_2 , MgO , Na_2O , TiO_2 [10].

В качестве источника лазерного излучения использовался импульсный лазер на иттербий-эрбиевом стекле (Glass: Yb, Er) с длиной волны генерации 1,54 мкм, работающий в режиме свободной генерации. Частота следования лазерных импульсов составляла величину порядка 0,2 Гц, длительность импульса – 30 ± 1 мс, энергия импульса – порядка 850 мДж, диаметр пучка – $1,1 \pm 0,05$ мм, плотность энергии – 90 ± 5 Дж/см².

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Лазерное излучение фокусировалось линзой с фокусным расстоянием $f' = 29$ мм на боковую поверхность графитового стержня. В результате воздействия импульсов лазерного излучения формировался эрозионный факел из продуктов лазерного разрушения исходного материала. Данный процесс сопровождался звуковыми (щелчок) и световыми (вспышка) эффектами. Продукты лазерного разрушения осаждались на поверхность подложки, располагаемой под графитовым стержнем вдоль направления лазерного излучения, и служили образцами для дальнейших исследований. В зависимости от метода исследования в эксперименте использовались подложки из кварцевого стекла, стали и твердой биологической ткани (эмаль и дентин зуба человека).

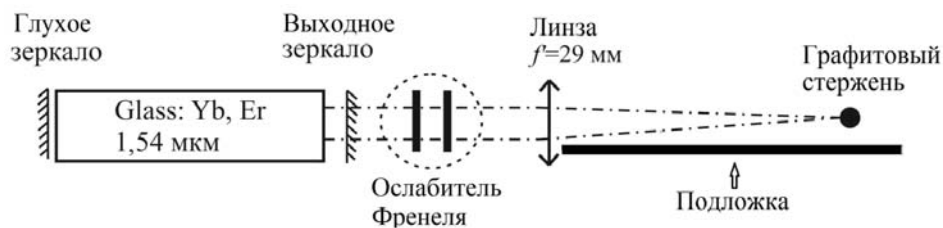


Рис. 1. Схема эксперимента

Образцы на подложках из кварцевого стекла были исследованы с помощью оптического микроскопа «Carl Zeiss AxioScope A1». Исследования полученных в результате лазерного разрушения графитового стержня структур средствами сканирующего электронного микроскопа «Carl Zeiss EVO 40» были проведены на поверхности металлической подложки. Часть поверхности металлической подложки во время процесса осаждения продуктов разрушения была изолирована от эрозионного факела для формирования на ее поверхности двух областей. Одна область содержала продукты лазерного разрушения, а другая не содержала. Между этими областями была видна четкая граница. Элементный состав полученных структур был установлен с помощью энерго-дисперсионного рентгеновского анализатора «INCA x-act».

В рамках настоящей работы также была измерена микротвердость материалов трех различных подложек, содержащих и не содержащих на поверхности продукты лазерного разрушения графитового стержня. В качестве материала подложек были выбраны сталь, эмаль и дентин зуба человека. Оценка микротвердости производилась методом Виккерса с помощью микротвердомера «ПМТ-2М» по двадцати отдельным измерениям.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлен внешний вид продуктов разрушения графитосодержащего композита, полученный с помощью оптического микроскопа. Как видно, размеры осажденных на кварцевой подложке микрочастиц достигают 10 мкм. Характерный размер микрочастиц лежит в диапазоне 1–3 мкм.

На рис. 3 представлены СЭМ-изображения покрытия, сформированного на металлической подложке в результате осаждения на ее поверхности продуктов лазерного разрушения графитосодержащего композита. Видно, что покрытие содержит микрочастицы, а также пленку, которая, как будет показано далее (рис. 5), представляет собой совокупность наноразмерных структур.

Рентгенофлуоресцентный анализ микрочастиц показал, что они состоят (рис. 4, а) из элементов, соответствующих составу природной глины (Si, O, Al и т.д.), что вполне объяснимо технологией изготовле-

ния используемых для исследования графитовых стержней. В состав сформированной лазерным излучением пленки входят те же вещества, однако весовой коэффициент углерода здесь превышает парциальные составляющие других элементов (рис. 4, б). Железо (Fe) входит в состав подложки и регистрируется при проведении рентгенофлуоресцентного анализа, потому что пучок электронов способен проникать на глубину, превышающую толщину покрытия или диаметр микрочастицы, и достигать подложки.

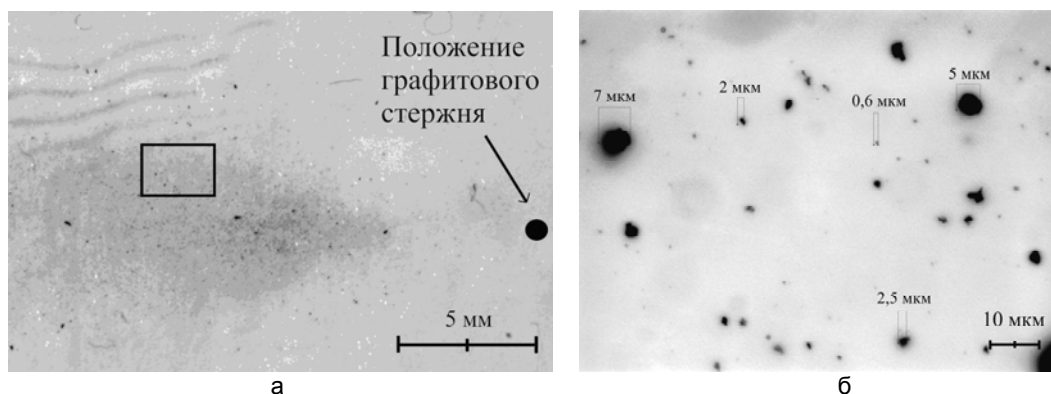


Рис. 2. Изображение продуктов разрушения графитового стержня излучением Glass: Yb, Er лазера, осажденных в виде покрытия на поверхности кварцевой подложки, полученное с помощью оптического микроскопа: общий вид (а); выделенная область при увеличении $100\times$ (б)

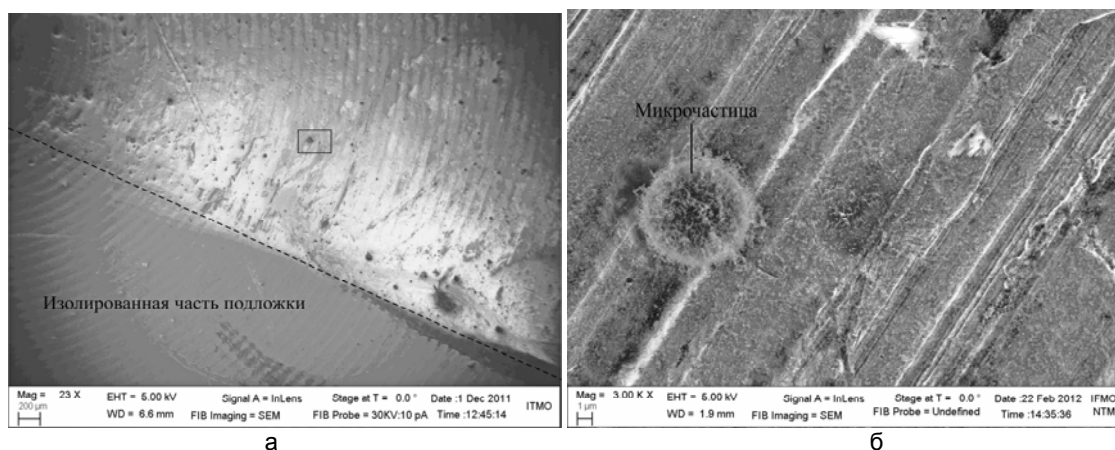


Рис. 3. Изображение продуктов разрушения графитового стержня излучением Glass: Yb, Er лазера, осажденных в виде покрытия на поверхности металлической подложки, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа: общий вид (а); выделенная область при увеличении $3000\times$ (б)

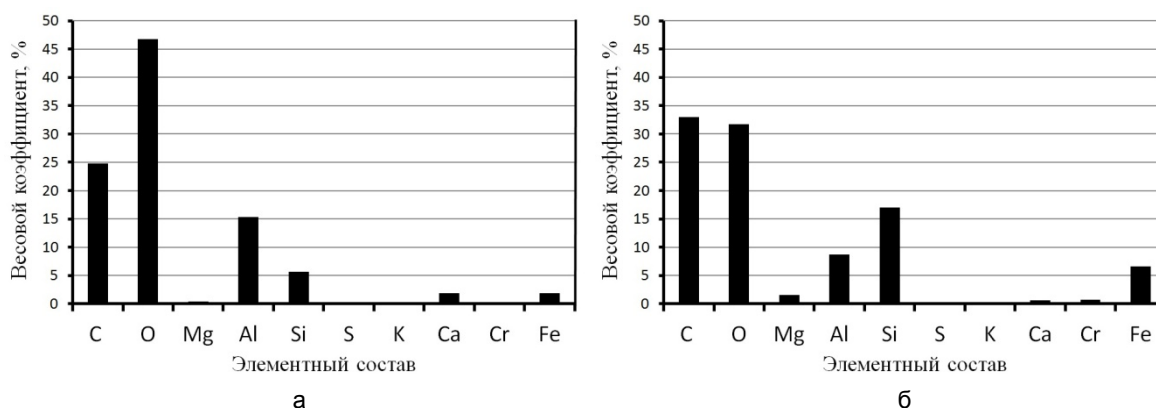


Рис. 4. Элементный состав продуктов разрушения графитового стержня излучением Glass: Yb, Er лазера, осажденных в виде покрытия на поверхности металлической подложки: микрочастица (а); пленка (б)

На рис. 5 представлены СЭМ-изображения структурных элементов пленки, сформированной при разрушении графитового стержня излучением Glass: Yb, Er лазера на поверхности металлической подложки, расположенной на расстоянии 1,5 см от графитового стержня, при различном увеличении. Из рис. 5 видно, что сформированная на поверхности металлической подложки при разрушении графитового стержня лазерным излучением пленка состоит из углеродных наноструктур, размеры которых изме-

няются от 20 нм до 50 нм. Из рис. 5, б, видно, что эти наноструктуры связаны между собой и образуют совокупности. Данные совокупности формируют на поверхности подложки аморфное нанопокрывание (рис. 5, в).

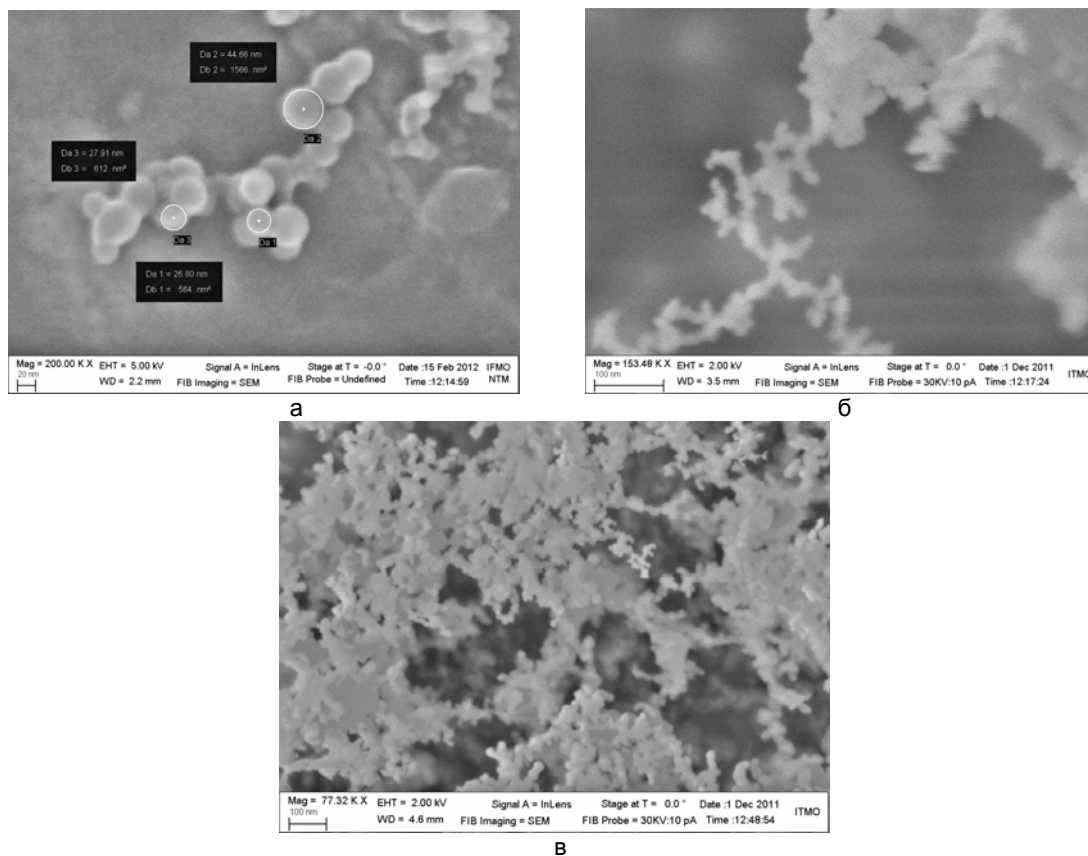


Рис. 5. Внешний вид структурных элементов пленки, полученной при разрушении графитового стержня излучением Glass: Yb, Er лазера, расположенного на расстоянии 1,5 см от поверхности графитового стержня, при увеличении: 200000^х (а); 150000^х (б); 77000^х (в)

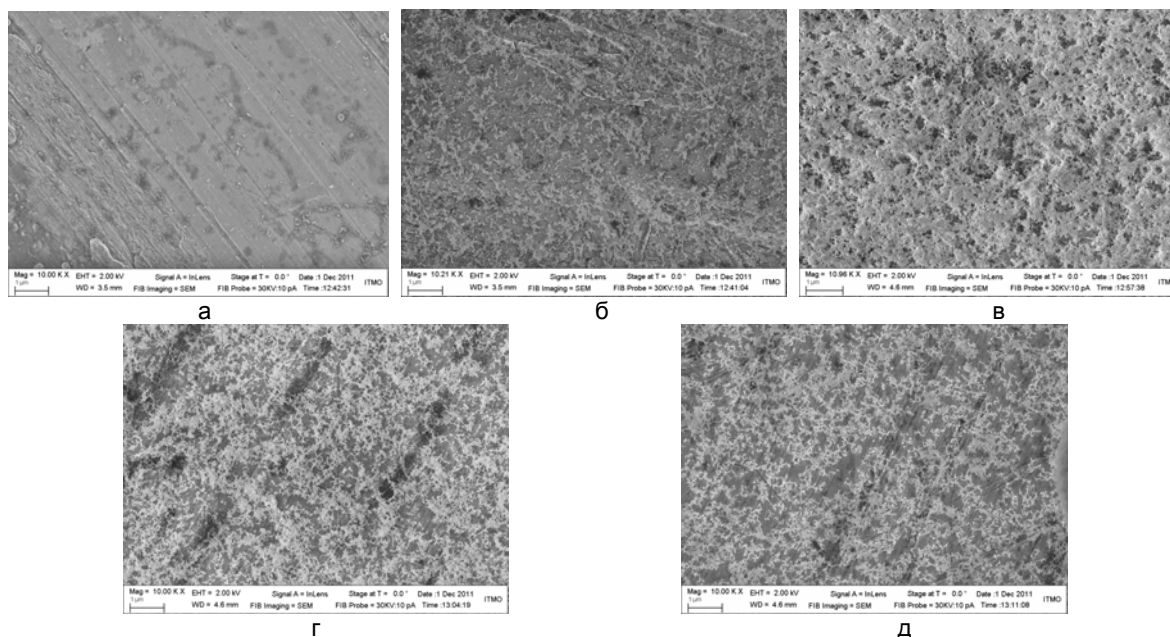


Рис. 6. СЭМ-изображение продуктов разрушения графитового стержня излучением Glass: Yb, Er лазера, осажденных в виде пленки на поверхности металлических подложек, расположенных на различных расстояниях X от поверхности графитового стержня, при увеличении порядка 10000^х: чистая подложка (а); X=1 см (б); X=1,5 см (в); X=2 см (г); д) X=2,5 см (д)

На рис. 6 представлены СЭМ-изображения поверхности чистой металлической подложки (рис. 6, а), а также поверхности подложек, содержащих аморфное нанопокрывтие, полученное в результате разрушения графитового стержня излучением Glass: Yb, Er лазера, при этом в процессе лазерного воздействия эти подложки располагались на различных расстояниях X от графитового стержня. Как видно из рис. 6, плотность заполнения поверхности подложки углеродными наноструктурами на расстоянии 1,5 см от графитового стержня качественно превышает эту величину для других расстояний. Таким образом, на данном расстоянии формируется более плотное нанопокрывтие, чем на остальных представленных. Размерного распределения наноструктур в зависимости от расстояния X от графитового стержня выявлено не было.

В таблице приведены результаты измерения микротвердости выбранных подложек до и после нанесения на них углеродных наноструктур, формируемых в поле излучения Glass: Yb, Er лазера.

Тип подложки	Микротвердость, ед. тв. по Виккерсу	
	Без покрытия	С покрытием
Металл	95±5	205±25
Эмаль зуба	355±25	430±50
Дентин зуба	75±5	140±10

Таблица. Результаты измерения микротвердости выбранных подложек в присутствии и отсутствии покрытия из наноразмерных углеродных наноструктур, полученных при разрушении графитового стержня излучением Glass: Yb, Er лазера

Таким образом, видно, что при нанесении на поверхность покрытий из углеродных наноструктур микротвердость металлической подложки увеличилась более чем в 2 раза, эмали зуба человека – в 1,2 раза, дентина зуба – почти в 2 раза.

Подобное изменение микротвердости может быть объяснено структурой покрытия, представляющего собой слои из цепочек углеродных наноструктур, которые, вероятно, благодаря плотному заполнению пространства препятствовали проникновению индентора микротвердомера в поверхность подложки. Следует отметить, что микротвердость материалов может быть увеличена путем нанесения на их поверхность соединений титана (TiN, TiON, TiAlN). При этом увеличение микротвердости для содержащих титан покрытий сопоставимо с увеличением микротвердости для покрытий, содержащих углеродные наноструктуры. Однако методы нанесения соединений титана – магнетронное, реактивное радиочастотное и плазменное распыления – сложны в реализации, так как требуют создания высокого вакуума, а также сопровождаются значительным повышением температуры поверхности материала подложки (до 400°C), что делает затруднительным процесс нанесения данных покрытий на объекты живой природы [11, 12].

Заключение

В работе впервые в результате воздействия миллисекундного излучения Glass: Yb, Er лазера на поверхность графитсодержащего композита были получены углеродные наноструктуры. Данные структуры осаждались в атмосфере воздуха, наносились на твердые подложки и исследовались методами оптической и сканирующей электронной микроскопии. Установлено, что размеры отдельных углеродных наноструктур лежат в диапазоне 20–50 нм.

Показано, что плотность заполнения поверхности подложки углеродными наноструктурами максимальна на расстоянии порядка 1,5 см от графитового стержня.

Экспериментально установлено, что покрытие, содержащее углеродные наноструктуры, способствует увеличению микротвердости поверхности металлической подложки, эмали и дентина зуба человека.

Литература

1. Tessonnier J.-P., Rosental D., Hansen T.W. Analysis of the structure and chemical properties of some commercial carbon nanostructures // Carbon. – 2009. – V. 47. – P. 1779–1798.
2. Baydogan N.D. Evaluation of optical properties of the amorphous carbon film on fused silica // Materials Science and Engineering. – 2004. – V. 107. – P. 70–77.
3. Rodil S.E., Olivares R., Arzate H., Muhl S. Properties of carbon films and their biocompatibility using in vitro test // Diamond and Related Materials. – 2003. – V. 12. – P. 931–937.
4. Wang J., Huang N., Yang P. The effects of amorphous carbon films deposited on polyethylene terephthalate on bacterial adhesion // Biomaterials. – 2004. – V. 25. – P. 3163–3170.

5. Zhou H., Ogino A., Nagatsu M. Investigation into the antibacterial property of carbon // Diamond and related materials. – 2008. – V. 17. – P. 1416–1419.
6. Рагуля А.В., Андриевский Р.А. Наноструктурные материалы. – М.: Academia, 2005. – 187 с.
7. Rao C.N.R., Seshadri R., Govindaraj A., Sen R. Fullerenes, nanotubes, onions and related carbon structures // Materials Science and Engineering. – 1995. – V. R 15. – P. 209–262.
8. Torrisi L., Caridi F., Margorone D. Carbon-plasma produced in vacuum by 532 nm – 3 ns laser pulses ablation // Applied Surface Science. – 2006. – V. 252. – P. 6383–6389.
9. Афанасьев Д.В., Баранов Г.Б., Беляев А.А. Получение фуллеренов при испарении графита стационарным CO₂-лазером // Письма в ЖТФ. – 2001. – Т. 27. – № 10. – С. 31–36.
10. Химическая энциклопедия в 5 томах / Под ред. И.Л. Кнунянц. – М.: Изд-во Советская энциклопедия, 1988. – Т. 1. – 624 с.
11. Guu Y.Y., Lin J.F., Chi-Fong A. The tribological characteristics of titanium nitride coatings. Part I. Coating thickness effects // Wear. – 1996. – V. 194. – P. 12–21.
12. Guu Y.Y., Lin J.F., Chi-Fong A. The tribological characteristics of titanium nitride coatings. Part II. Comparisons of two deposition processes // Wear. – 1996. – V. 194. – P. 22–29.

- | | |
|--------------------------------------|---|
| Беликов Андрей Вячеславович | – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, meddv@grv.ifmo.ru |
| Скрипник Алексей Владимирович | – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, alesch_skrypnik@mail.ru |
| Зулина Наталья Алексеевна | – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, zulina-tsu@mail.ru |

УДК 535:621.373.826:539

**АБЛЯЦИЯ ТВЕРДЫХ ТКАНЕЙ ЗУБА ЧЕЛОВЕКА ИЗЛУЧЕНИЕМ
YLF: Eг ЛАЗЕРА С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ****А.В. Беликов, М.В. Иночкин, А.В. Скрипник, Л.В. Хлопонин, В.Ю. Храмов, К.В. Шатилова**

Разработан макет YLF: Eг микролазера с диодной накачкой. Исследованы особенности воздействия излучения разработанного макета микролазера с длиной волны генерации 2,84 мкм на твердые ткани зуба человека. Обнаружены эффекты побеления, карбонизации и абляции твердых тканей зуба человека в результате лазерного воздействия. Определены пороги этих эффектов. Установлено, что микротвердость дентина зуба человека может быть увеличена более чем на 20% в результате многократного воздействия лазерных импульсов с энергией ниже порога побеления.

Ключевые слова: YLF: Eг лазер, диодная накачка, эмаль, дентин, абляция, микротвердость.

Введение

Эрбиевые лазеры с ламповой накачкой успешно используются для обработки эмали и дентина [1]. Современный этап развития лазерных технологий в стоматологии связан с разработкой и исследованием применения эрбиевых микролазеров с диодной накачкой. В настоящем исследовании в качестве активной среды таких микролазеров предлагается использовать кристалл YLF: Eг, позволяющий получать генерацию в диапазоне длин волн 2,66–2,84 мкм [2].

В работах [3–6] были проведены исследования воздействия на эмаль и дентин зуба человека излучения YLF: Eг лазера с различными длинами волн. В [3, 4] описаны основные процессы, происходящие при взаимодействии лазерного излучения трехмикронного диапазона с твердыми тканями зуба человека. Определены пороги разрушения эмали и дентина излучением YLF: Eг лазера с длиной волны 2,81 мкм. В [5] был определен порог разрушения дентина излучением YLF: Eг лазера с длиной волны 2,66 мкм. В [5, 6] проводилась обработка твердых тканей зуба, а именно – создание текстур и микроканалов излучением YLF: Eг лазера с диодной накачкой и длинами волн генерации 2,66 и 2,81 мкм. Было показано, что эффективность удаления эмали и дентина излучением YLF: Eг лазера с $\lambda=2,66$ мкм в 2 раза меньше, а с $\lambda=2,81$ мкм – в 3 раза меньше эффективности удаления биотканей излучением YAG: Eг лазера с ламповой накачкой ($\lambda=2,94$ мкм). В [6] была продемонстрирована возможность создания микроканалов в дентине с аспектным соотношением более 4.

В настоящей работе описан макет YLF: Eг микролазера с диодной накачкой и длиной волны генерации 2,84 мкм. Исследованы эффекты, возникающие в результате воздействия излучения YLF: Eг лазера на эмаль и дентин зуба человека, определены пороги этих эффектов. Проведено исследование изменения микротвердости дентина вследствие многократного воздействия YLF: Eг излучения.

Материалы и методы

В эксперименте использовались зубы человека, принадлежащие одной возрастной категории людей (25–40 лет), удаленные по ортодонтическим показаниям. До начала эксперимента образцы хранились в 0,1%-ом водном растворе тимолола не более двух недель при температуре +4°C в защищенном от света месте.

Воздействие на биоткань проводилось излучением одномодового YLF: Eг лазера с диодной накачкой, работающего в режиме свободной генерации, на длине волны генерации 2,84 мкм. Энергия E_p и длительность τ_p одиночного лазерного импульса для YLF: Eг ($\lambda=2,84$ мкм) изменялись посредством варьирования тока накачки $I_{\text{нак}}$ и длительности импульса накачки $\tau_{\text{нак}}$. В работе использовались три величины импульса накачки: 300, 650 и 1000 мкс, при частоте следования импульсов 3 Гц. На рис. 1 представлены осциллограммы YLF: Eг лазерных импульсов, полученные при различном токе и длительности импульсов диодной накачки. При длительности импульса накачки $\tau_{\text{нак}}=300$ мкс и токе накачки $I_{\text{нак}}=2\text{--}20$ А длительность импульса YLF: Eг излучения τ_p составляла 160–290 мкс, энергия импульса YLF: Eг излучения E_p – до 2 мДж; при $\tau_{\text{нак}}=650$ мкс и $I_{\text{нак}}=2\text{--}16$ А τ_p составляла 430–650 мкс, E_p – до 3,4 мДж; при $\tau_{\text{нак}}=1000$ мкс и $I_{\text{нак}}=2\text{--}12$ А τ_p составляла 720–1010 мкс, E_p – до 4 мДж.

В работе измерялись пороги эффектов, возникающих в биоткани в результате лазерного воздействия с различной энергией и длительностью YLF: Eг лазерного импульса. Под порогом в данном случае

понималась минимальная энергия YLF: Ег лазерного импульса, при которой возникал эффект. В исследовании непосредственно перед экспериментом на поверхности эмали и дентина формировалась плоская площадка при помощи алмазного диска. Лазерная обработка тканей зуба производилась в одноимпульсном ($N_p = 1$), неконтактном режиме, без внешнего водяного охлаждения. Лазерное излучение фокусировалось на поверхность биоткани в пятно диаметром порядка 200 мкм по уровню e^{-2} . После однократного воздействия импульса YLF: Ег лазера биоткань смещалась, а следующее однократное воздействие проводилось уже в новую область поверхности образца. После каждого воздействия ток накачки изменялся на 1 А. Оценка состояния поверхности эмали и дентина зуба человека после лазерного воздействия осуществлялась с помощью оптического микроскопа AxioScope A1 (Carl Zeiss). Фотографирование проводилось при помощи камеры AxioCam ICm1 (Carl Zeiss).

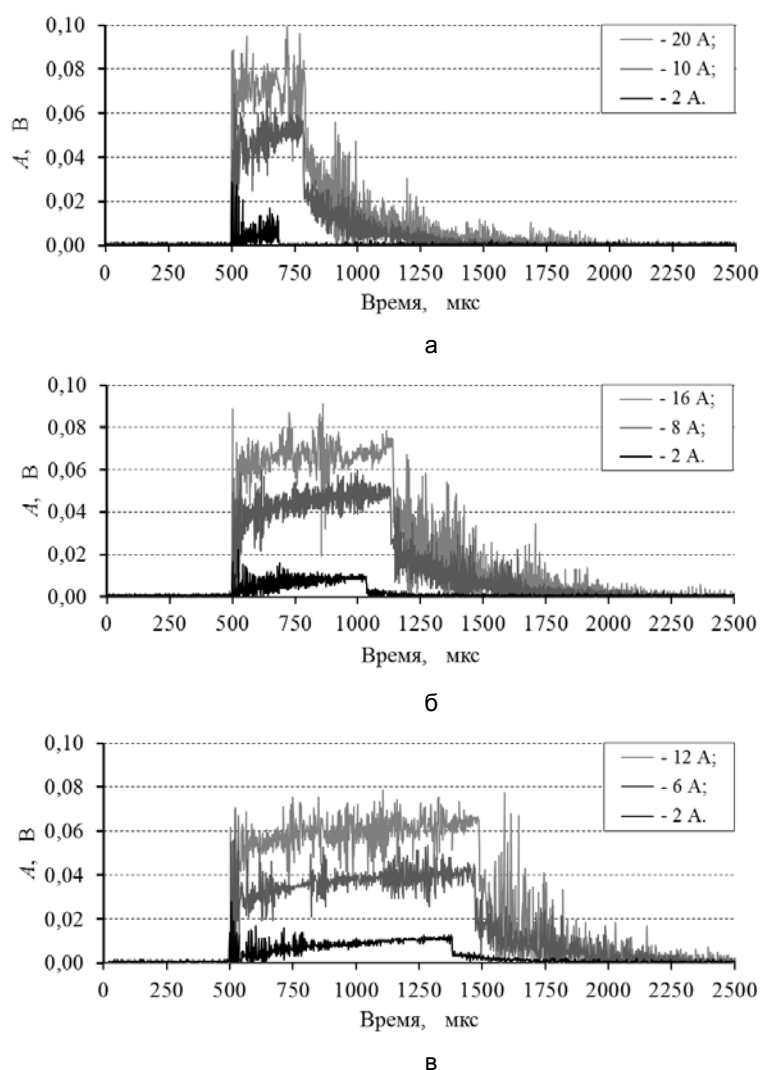


Рис. 1. Осциллограммы импульсов YLF: Ег лазера, типичных для различных токов и импульсов накачки, используемых в настоящем исследовании: $\tau_{\text{нак.}} = 300$ мкс (а); $\tau_{\text{нак.}} = 650$ мкс (б); $\tau_{\text{нак.}} = 1000$ мкс (в)

В работе исследовалось влияние излучения YLF: Ег микролазера на микротвердость дентина корня зуба. В этой части работы авторы производили воздействие на дентин зуба человека в многоимпульсном режиме ($N_p = 10, 55, 100, 150$ и 200), неконтактно, без внешнего водяного охлаждения. Параметры лазерного излучения были следующими: плотность энергии лазерного излучения $6,0 \pm 0,1$ Дж/см², $\tau_p = 270$ мкс, частота следования импульсов – 3 Гц. Предварительно на поверхности дентина формировалась плоская площадка при помощи алмазного диска. На поверхности такой площадки проводилось измерение микротвердости по методу Виккерса интактного дентина при нагрузке 100 г. Для таких измерений использовался микротвердомер «ПТМ–3М» (ОАО «ЛОМО»). Затем на этой поверхности с помощью YLF: Ег микролазера создавалась текстура. Общий размер текстуры $\sim 400 \times 400$ мкм (5×5 точек). Расстоя-

ние между центрами элементов в текстуре составляло ~ 80 мкм. Далее в месте воздействия проводилось измерение микротвердости обработанного дентина при нагрузке 100 г.

Результаты и обсуждения

В результате экспериментов было установлено, что воздействие излучения YLF: Ег лазера ($\lambda=2,84$ мкм) на эмаль зуба человека приводит к появлению двух эффектов: побеление и абляция (рис. 2, а, б), а на дентин – трех эффектов: побеление, абляция и карбонизация (рис. 2, в–д). Эффект побеления связывается с тем, что на биоткань воздействует лазерный импульс с энергией, недостаточной для разрушения и выноса материала (абляции эмали или дентина), но достаточной для изменения ее рассеивающих свойств, происходящих в результате испарения воды, возникновения микротрещин, переориентации кристаллов гидроксиапатита и т.д.

Зависимости порогов эффектов, возникающих в результате воздействия на эмаль или дентин зуба человека одиночного импульса YLF: Ег лазера от длительности лазерного импульса, представлены на рис. 3. Следует отметить, что сокращение длительности импульса излучения приводит к снижению порога.

Результаты измерения микротвердости (HV) дентина после многоимпульсной обработки излучением YLF: Ег лазера представлены на рис. 4. Изменение микротвердости ΔHV рассчитывалось в соответствии с выражением

$$\Delta HV = \frac{HV_{\text{воз.}} - HV_{\text{инт.}}}{HV_{\text{инт.}}} \cdot 100,$$

где $HV_{\text{инт.}}$ – микротвердость интактного дентина; $HV_{\text{воз.}}$ – микротвердость дентина после воздействия YLF: Ег лазера. Видно, что после воздействия на дентин в многоимпульсном режиме $N_p=150$ микротвердость дентина возрастает на 20–25%.

На рис. 5 показаны фотографии отпечатков от микротвердомера до и после лазерного воздействия на дентин. Среднее значение длины ребра отпечатка до лазерного воздействия при 150 импульсах составило 60 ± 2 мкм, после лазерного воздействия – 54 ± 2 мкм.

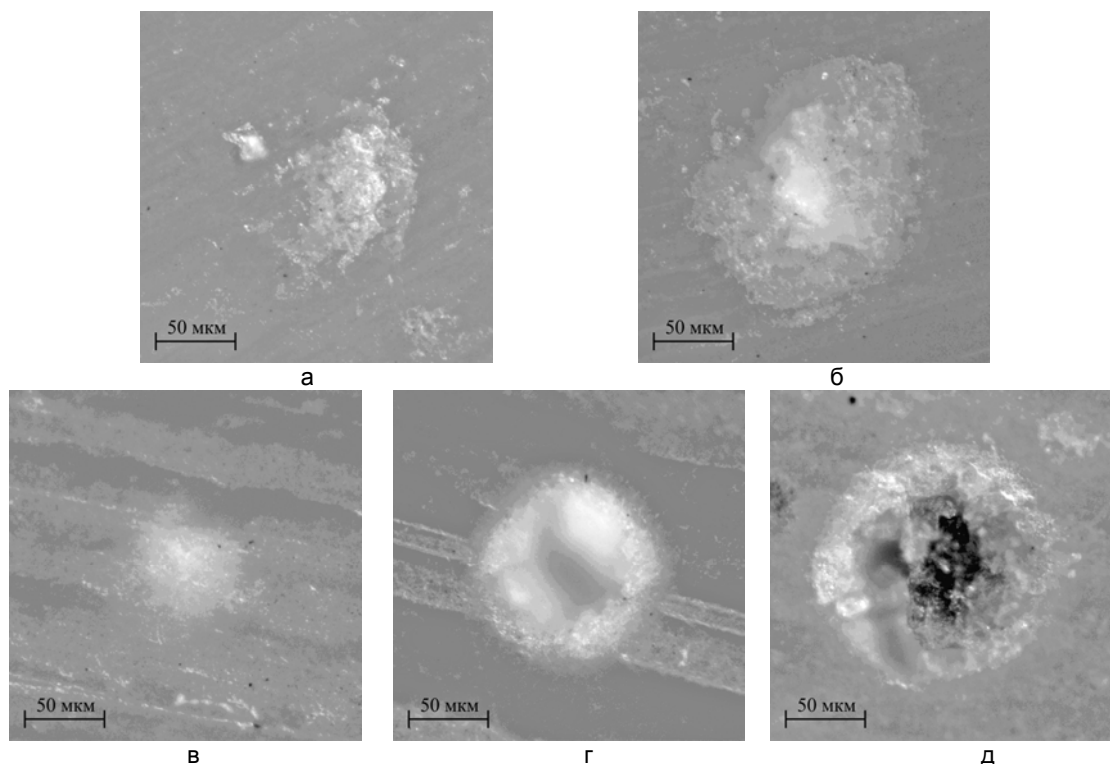


Рис. 2. Эффекты, возникающие в результате однократного воздействия излучения YLF: Ег лазера на эмаль и дентин зуба человека: побеление эмали ($E_p = 1,82$ мДж, $\tau_p = 970$ мкс) (а); абляция эмали ($E_p = 4,01$ мДж, $\tau_p = 1010$ мкс) (б); побеление дентина ($E_p = 0,71$ мДж, $\tau_p = 275$ мкс) (в); абляция дентина ($E_p = 1,49$ мДж, $\tau_p = 290$ мкс) (г); карбонизация дентина ($E_p = 3,33$ мДж, $\tau_p = 990$ мкс) (д)

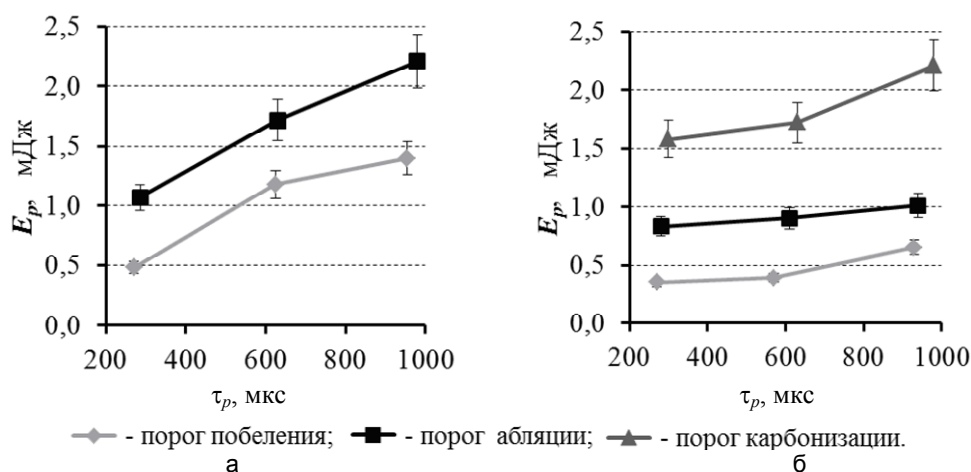


Рис. 3. Зависимость порогов эффектов побеления, карбонизации и абляции от длительности импульса YLF: Er лазера ($N_p = 1$): эмаль (а); дентин (б)

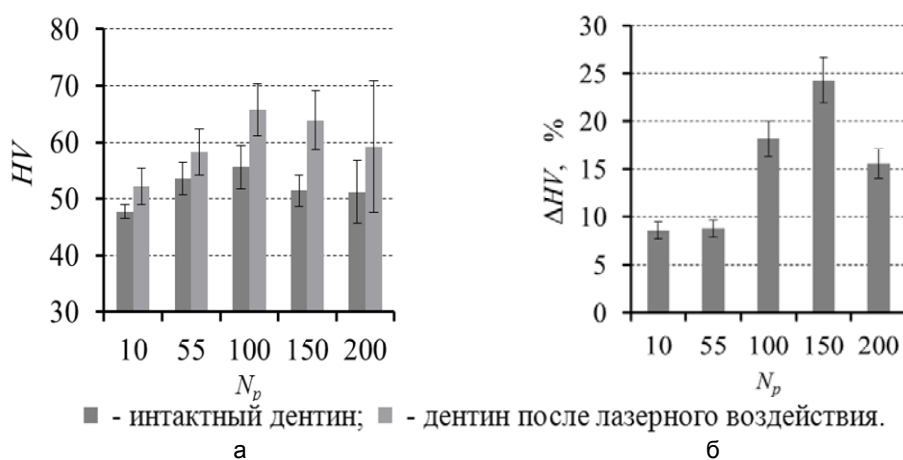


Рис. 4. Результаты измерения микротвердости дентина до и после многоимпульсного воздействия излучением YLF: Er лазера: результаты абсолютных измерений микротвердости (а); изменение микротвердости после лазерного воздействия (б)

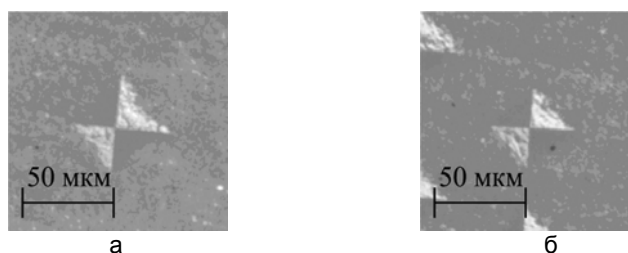


Рис. 5. Фотографии отпечатков от микротвердомера на поверхности дентина зуба человека: intactный дентин (а); после воздействия излучения YLF: Er лазера (б)

Заключение

Исследованы особенности воздействия излучения YLF: Er микролазера ($\lambda = 2,84$ мкм) с диодной накачкой на эмаль и дентин зуба человека. Установлено, что однократное воздействие излучения данного лазера способно вызвать в эмали такие эффекты, как побеление и абляция, а в дентине – побеление, карбонизация и абляция. Были определены пороги наблюдаемых эффектов. Установлено, что сокращение длительности лазерного импульса приводит к снижению любого из порогов. Многократное $N_p = 150$ воздействие излучения YLF: Er лазера на intactный дентин зуба человека с плотностью энергии $6,0 \pm 0,1$ Дж/см², длительностью импульса порядка 270 мкс и частотой следования импульсов, равной 3 Гц, приводит к повышению микротвердости дентина более чем на 20%.

Литература

1. Coluzzi D.J., Convissar R.A. Atlas of laser applications in dentistry. – Quintessence Publishing Co, 2007. – 220 p.
2. Иночкин М.В., Назаров В.В., Сачков Д.Ю., Хлопонин Л.В., Храмов В.Ю. Динамика спектра излучения Er: YLF-лазера в импульсно-периодическом режиме работы // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77. – № 7. – С. 8–13.
3. Belikov A.V., Erofeev A.V., Shumilin V.V., Tkachuk A.M. Comparative study of the 3 μ m laser action on different hard tooth tissue samples using free running pulsed Er-doped YAG, YSGG, YAP and YLF lasers // Proc. of SPIE. Dental Applications of Lasers. – 1993. – V. 2080. – P. 60–67.
4. Altshuler G.B., Belikov A.V., Erofeev A.V. Laser treatment of enamel and dentine by different Er-lasers // Proc. of SPIE. – 1994. – V. 2128. – P. 273–281.
5. Беликов А.В., Скрипник А.В., Шатилова К.В. Сравнительное исследование параметров элементов текстур, сформированных излучением YAG: Er и YLF: Er лазеров на поверхности твердых тканей зуба человека // Материалы 14-ой Международной молодежной научной школы по оптике, лазерной физике и биофизике (5–8 октября 2010 г.). Проблемы оптической физики и биофотоники. – Саратов: Новый Ветер, 2010. – С. 20–26.
6. Беликов А.В., Скрипник А.В., Струнина Т.В., Шатилова К.В. Исследование процессов воздействия оптического излучения на биологические ткани и элементы лазерных систем // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 4 (74). – С. 107–111.

Беликов Андрей Вячеславович	– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, meddv@grv.ifmo.ru
Иночкин Михаил Владимирович	Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, m_inochkin@mail.ru
Скрипник Алексей Владимирович	– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, alesch_skrypnik@mail.ru
Хлопонин Леонид Викторович	– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, l_khloponin@yahoo.com
Храмов Валерий Юрьевич	– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, khramov@grv.ifmo.ru
Шатилова Ксения Владимировна	– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, kshatilova@mail.ru

УДК [517.938+519.713/.718]:621.398

ЛИНЕЙНАЯ КОММУТАЦИЯ СТРУКТУРЫ ПРОСТРАНСТВА НЕЛИНЕЙНЫХ УСТРОЙСТВ РЕКУРРЕНТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДВОИЧНЫХ КОДОВ**А.В. Ушаков, Е.С. Яицкая**

Рассматривается задача линейной коммутации структуры пространства нелинейных устройств рекуррентного преобразования двоичных кодов, блок памяти которых построен в логике произвольных триггеров, с помощью нелинейной формируемого сигнала. Предлагается алгоритм синтеза таких устройств. Приводится иллюстративный пример.

Ключевые слова: произвольный триггер, функции перехода и возбуждения входов триггеров, структура пространства, матрица коммутирующего входа, основная конъюнкция вектора состояния, сигнал коммутации.

Введение

Каноническое представление «вход–состояние–выход» произвольной двоичной динамической системы (ДДС) задается в виде двух векторных выражений [1, 2]

$$x(k+1) = \lambda[x(k), u(k)], \quad (1)$$

$$y(k) = \delta[x(k)], \quad (2)$$

в которых $\lambda[x(k), u(k)]$, $\delta[x(k)]$ именуются соответственно функциями перехода и выхода. Если функции перехода и выхода допускают представление в виде линейных операций умножения матрицы на вектор и суммирования [3], то система именуется линейной двоичной динамической (ЛДДС), если такой возможности нет, то соотношения (1)–(2) задают нелинейную двоичную динамическую систему (НДДС) с вектором состояния $x(k)$ размерности $\dim x(k) = n = \lceil \log_2 n_t \rceil$, где n_t – размерность ЛДДС, которая решает аналогичную с НДДС задачу преобразования кодов, k – дискретное время, выраженное в числе тактов длительностью Δt .

Нетрудно видеть из (1)–(2), что любая ДДС представляет собой функциональное объединение блока памяти (БП), который строится над двоичным полем Галуа $GF(p)|_{p=2} = \{0;1\}$ на триггерах, и комбинационной схемы, реализующей правила λ и δ . В схемотехнике современных устройств дискретной автоматики и техники преобразования кодов и кодовых последовательностей выделяют четыре базовых типа триггеров:

1. линейный синхронный одновходовый D -триггер;
2. линейный асинхронный одновходовый T -триггер;
3. нелинейный синхронный двухвходовый JK -триггер;
4. нелинейный асинхронный двухвходовый RS -триггер [1].

Очевидно, ЛДДС при реализации БП в своем составе используют линейные триггеры, причем в основном D -типа. НДДС могут быть реализованы на триггерах любых из перечисленных выше типов. При этом триггер как конечный автомат (КА) первого порядка, реализующий автоматную логику Мура [1], задается двумя функциями: функцией перехода вида $x(k+1) = \lambda_*[x(k), v_*(k)]$ и функцией возбуждения информационного входа (входов) вида $v_*(k) = \mu_*[x(k), x(k+1)]$. Для случая нелинейных триггеров обе функции задаются в виде дизъюнкций основных конъюнкций, что делает их аналитически нелинейными.

Аналитические представления функций перехода и функций возбуждения входов триггеров

Аналитические представления функций перехода $\lambda_* : x(k+1) = \lambda_*[x(k), v_*(k), c(k)]$ и возбуждения информационных входов $v_*(k) = \mu_*[x(k), x(k+1)]$ в силу [1, 4] принимают следующий вид:

- для D -триггера $\begin{cases} \lambda_D : x(k+1) = \bar{c}(k)x(k) \vee c(k)v_D(k) = v_D(k)|_{c(k)=1}; \\ \mu_D : v_D(k) = x(k+1)|_{c(k)=1} \end{cases};$
- для T -триггера $\begin{cases} \lambda_T : x(k+1) = x(k) + v_T(k); \\ \mu_T : v_T(k) = x(k) + x(k+1) \end{cases};$

- для RS -триггера $\left\{ \begin{array}{l} \lambda_{RS} : x(k+1) = v_S(k) \bar{v}_R(k) \vee \bar{v}_R(k) x(k) \\ \mu_{RS} : v_S(k) = x(k+1) \bar{x}(k); v_R(k) = \bar{x}(k+1) x(k) \end{array} \right.$;
- для JK -триггера $\left\{ \begin{array}{l} \lambda_{JK} : x(k+1) = \bar{v}_K(k) x(k) \vee v_J(k) \bar{x}(k) \\ \mu_{JK} : v_J(k) = x(k+1) \bar{x}(k); v_K(k) = x(k+1) \bar{x}(k); c(k) = 1 \end{array} \right.$

Функции перехода триггеров D - и T - типа показывают, что состояние перехода $x(k+1)$ линейно связано с исходным состоянием $x(k)$ и с сигналом на информационном входе этих триггеров. При этом T - триггер представляет собой D - триггер, охваченный единичной обратной связью, и, если D - триггер описывается передаточной функцией $\Phi_D(d) = d$, то T - триггер – $\Phi_T(d) = d/(1+d)$. Триггеры RS - и JK - типа – нелинейные, так как их функции перехода показывают, что состояние перехода $x(k+1)$ нелинейно связано с исходным состоянием $x(k)$ и с сигналами на информационных входах этих триггеров. Все асинхронные триггеры (T - и RS - типа) могут быть поставлены в режим синхронных, если информационные входы этих триггеров возбуждать сигналами в виде конъюнкций $\{c(k)v_T(k)\}$ и $\{c(k)v_S(k)\}$, $\{c(k)v_R(k)\}$.

Путем сравнения таблиц истинности функций перехода триггеров можно выявить возможность реализации одного триггера средствами другого. Таких «реализационных пар» не мало, приведем примеры некоторых из них. Так, D - триггер может быть реализован с помощью T - триггера в форме $\{v_T(k) = v_D(k) + x(k)\}$, RS - триггера в форме $\{v_S(k) = v_D(k); v_R(k) = \bar{v}_D(k)\}$ и JK - триггера с помощью сигналов $\{c(k) = c(k); v_J(k) = v_D(k); v_K(k) = \bar{v}_D(k)\}$.

В свою очередь, T - триггер может быть реализован с помощью D - триггера в формах $\{v_D(k) = v_T(k) + x(k)\}$ и $\{c(k) = v_T(k); v_D(k) = \bar{x}(k)\}$, с помощью RS - триггера в форме $\{v_S(k) = v_T(k) + x(k); v_R(k) = (v_T(k) + x(k))\}$, а также JK - триггера в форме сигналов $\{c(k) = v_T(k); v_J(k) = v_K(k) = 1\}$.

Таким образом, триггеры обладают свойством взаимной функциональной трансформируемости.

Постановка задачи линейной коммутации структуры пространства НДДС, построенных в логике произвольных триггеров

Задача решается на примере НДДС, БП которой реализован на D - триггерах, которые представляют собой элементы задержки на интервал дискретности длительности Δt , т.е. на один такт, и аналитически задаются передаточной функцией $\Phi_D(d) = d$.

Следует заметить, что в теории и практике ДДС возникают «пограничные» задачи, решение которых требует изменения структуры пространства [5] системы (1). К ним относятся задачи построения генераторов управляющих, тестовых и скремблирующих последовательностей, устройств управления приемом помехозащищенных кодов, помехозащитные свойства которых реализованы в режиме обнаружения искажений, а не исправления. Эти задачи сводятся к организации перехода ДДС из данного исходного состояния $x(k)$ в требуемое состояние перехода $x_R(k+1)$ под действием некоторого служебного сигнала коммутации u_c , инициация которого порождается внешним вынуждающим сигналом $v_f(k)$.

Постановка задачи. Осуществить переход НДДС (1) из исходного состояния $x(k)$ в требуемое состояние $x_R(k+1)$ с помощью служебного скалярного сигнала коммутации u_c и дополнительной матрицы-столбца коммутирующего входа $\mathbf{B}_c$, включение которых приводит (1) к виду

$$x_R(k+1) = \lambda[x(k), u(k)] + \mathbf{B}_c u_c, \quad (3)$$

для чего разработать способы формирования дополнительной матрицы коммутирующего входа $\mathbf{B}_c$ и сигнала коммутации u_c .

Таким образом, предметом работы являются формирование аналитических представлений матрицы $\mathbf{B}_c = \mathbf{B}_c(x_R(k+1), \lambda[x(k), u(k)])$ в предположении, что в (3) обеспечено выполнение равенства

$$u_c = 1; \quad (4)$$

а также поиск структурных и сигнальных способов формирования сигнала коммутации u_c вида (4).

Формирование аналитического представления для матрицы коммутирующего входа и сигнала коммутации структуры пространства состояний НДДС

Рассмотрение проблемы, вынесенной в заголовок раздела, начнем с доказательства утверждений и формулирования определений.

Утверждение 1 (У.1). Если для НДДС (3) заданы вектор требуемого состояния перехода $x_R(k+1)$ и вектор исходного состояния $x(k)$, а также выполняется условие (4), то матрица $\mathbf{B}_c$ коммутирующего входа, с помощью которой осуществляется переход из $x(k)$ в $x_R(k+1)$, определяется выражением

$$\mathbf{B}_c = x(k+1) + x_R(k+1), \quad (5)$$

где $x(k+1) = \lambda[x(k), u(k)]$ – переходное состояние в случае отсутствия сигнала коммутации. $\square$

Доказательство утверждения строится на использовании соотношения (3) в предположении заданных $x_R(k+1)$, $x(k)$ и известной функции перехода (1) с последующим разрешением (3) относительно матрицы $\mathbf{B}_c$. $\blacksquare$

Определение 1 (О.1). Основной конъюнкцией $\&\{\bullet\}$ набора $\bullet = (x_1, x_2 \dots x_i \dots x_n)$ двоичных переменных называется конъюнкция, которая на данном наборе принимает единичное значение $\&\{\bullet\} = 1$. $\square$

Перенесем это определение с набора булевых переменных на вектор, составленный из тех же переменных.

Определение 2 (О.2). Основной конъюнкцией $\&\{*\}$ вектора $\{*\} = (x(k))$, составленного из элементов $x_i \in GF(2) = \{0;1\}$, будем называть конъюнкцию, которая на данном наборе двоичных переменных, образующих вектор $x(k)$, принимает единичное значение $\&\{*\} = 1$. $\square$

Сформулируем утверждение для сигнала коммутации u_c НДДС вида (3).

Утверждение 2 (У.2). Сигнал коммутации u_c для НДДС (3) может быть сформирован в виде основной конъюнкции исходного вектора состояния $x(k)$ и сигнала v_f принуждения изменения порядка (1) состояний НДДС на (3) в силу графов канонических переходов $u(k) = 1$. $\square$

Доказательство. Рассмотрим НДДС (3) с введенным в нее сигналом коммутации u_c . На момент коммутации (на момент начала перехода из исходного состояния $x(k)$) сигнально представлены только состояние $x(k)$ и дополнительный внешний сигнал принуждения v_f , несущий информацию об изменении порядка состояний НДДС в силу графа канонических переходов ($u(k) = 1$). Таким образом, скалярный сигнал коммутации u_c единичного значения можно получить, формируя основную конъюнкцию вида $u_c = \&\{x(k), v_f\}$. $\blacksquare$

Схема формирования сигнала коммутации для версии НДДС (3) представлена на рис. 1. При этом решение задачи строится применительно к случаю реализации НДДС на D -триггерах в автоматной логике Мура. Представим процесс формирования матрицы-столбца входа $\mathbf{B}_c$ и скалярного сигнала коммутации u_c НДДС в виде следующего алгоритма.

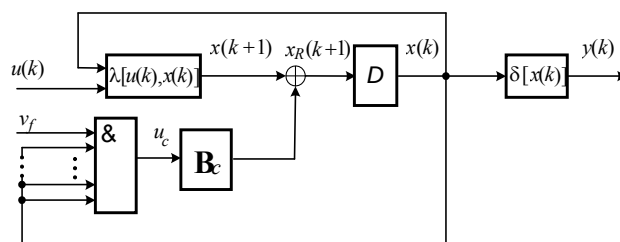


Рис. 1. Схема формирования сигнала коммутации нелинейной двоичной динамической системы (D – многомерный D -триггер; $\oplus$ – сумматор по модулю два)

Алгоритм 1 (А.1)

1. Задать граф и совмещенную таблицу переходов и выходов проектируемого устройства преобразования двоичных кодов (УПДК) на уровне его абстрактного представления (АП) в автоматной логике Мура.
2. Перейти от АП УПДК к представлению его в виде КА путем двоичного кодирования состояний и выходов АП, в результате чего УПДК будет представлен в виде НДДС с совмещенной таблицей переходов и выходов, записанной в кодах.
3. По совмещенной таблице переходов и выходов п.1 составить аналитические представления функций (1), (2) в булевом базисе.
4. Задать два набора векторов состояний: один из них – набор $\{x(k)\}$ исходных состояний $x(k)$, из которых в силу решаемой задачи требуется осуществить переход, а другой – набор $\{x_R(k+1)\}$ со-

- стояний перехода $x_R(k+1)$, в которые требуется осуществить переход в силу решаемой задачи, организовав на этих наборах пары, действующие в переходах.
5. Сформировать согласно утверждению У.2 набор $\{u_c\}$ сигналов коммутации в виде конъюнкций $u_c = \&\{x(k), v_f\}$.
 6. Вычислить набор $\{B_c\}$ матриц-столбцов коммутирующих входов B_c вида (5).
 7. Составить описание полученного устройства коммутации в форме (3).
 8. Осуществить проверку правильности функционирования устройства.
 9. Осуществить техническую реализацию. ■

Пример. Рассматривается НДДС, средствами которой входная двоичная последовательность $u(k) = 1(k):111...11...$ преобразуется в выходную управляющую последовательность $y(k):1101000|1101000|...$ с периодом $T = 7$. Решается задача конструирования УПДК, которое с помощью внешнего принуждающего сигнала v_f преобразует НДДС, генерировавшую управляющую последовательность с периодом $T = 7$ в НДДС, генерирующую управляющую последовательность с периодом $T = 5$ вида $y(k):11010|11010|...$, путем введения в исходную НДДС дополнительного сигнала коммутации u_c . Для решения поставленной задачи воспользуемся алгоритмом А.1, в результате чего получим:

1. граф и таблицу переходов и выходов проектируемого УПДК на уровне его АП (рис. 2, табл. 1), а также таблицу кодирования элементов алфавитов высокого уровня АП элементами двоичного поля Галуа $GF(2) = \{0;1\}$ (табл. 2) и совмещенную таблицу переходов и выходов КА (табл. 3);

2. аналитические представления функций (1), (2) в булевом базисе

$$y(k) = \bar{x}_1(k)\bar{x}_2(k) \vee \bar{x}_1(k)x_2(k)x_3(k);$$

$$x_1(k+1) = u_{D1}(k) =$$

$$= x_1(k)\bar{x}_2(k)\bar{x}_3(k) \vee x_1(k)\bar{x}_2(k)x_3(k) \vee \bar{u}(k)x_1(k)x_2(k)\bar{x}_3(k) \vee u(k)\bar{x}_1(k)x_2(k)x_3(k);$$

$$x_2(k+1) = u_{D2}(k) =$$

$$= \bar{x}_1(k)x_2(k)\bar{x}_3(k) \vee u(k)\bar{x}_2(k)x_3(k) \vee \bar{u}(k)\bar{x}_1(k)x_2(k)x_3(k) \vee \bar{u}(k)x_1(k)x_2(k)\bar{x}_3(k);$$

$$x_3(k+1) = u_{D3}(k) =$$

$$= \bar{u}(k)\bar{x}_2(k)x_3(k) \vee u(k)\bar{x}_2(k)\bar{x}_3(k) \vee \bar{u}(k)\bar{x}_1(k)x_2(k)x_3(k) \vee u(k)\bar{x}_1(k)x_2(k)\bar{x}_3(k);$$

3. вектор исходного состояния $x(k) = x(4)$, из которого требуется осуществить переход в вектор требуемого состояния $x_R(k+1) = x(0)$;

4. сигнал коммутации согласно утверждению У.2 $u_c = \&\{x(4), v_f\} = x_1(k)\bar{x}_2(k)\bar{x}_3(k)v_f$;

5. матрицу-столбец коммутирующего входа

$$B_c = x(k+1) + x_R(k+1) = [101]^T + [000]^T = [101]^T;$$

6. описание полученного устройства коммутации

$$x_{R1}(k+1) = u_{D1}(k) + B_{c1}u_c; \quad x_{R2}(k+1) = u_{D1}(k) + B_{c2}u_c; \quad x_{R3}(k+1) = u_{D1}(k) + B_{c3}u_c;$$

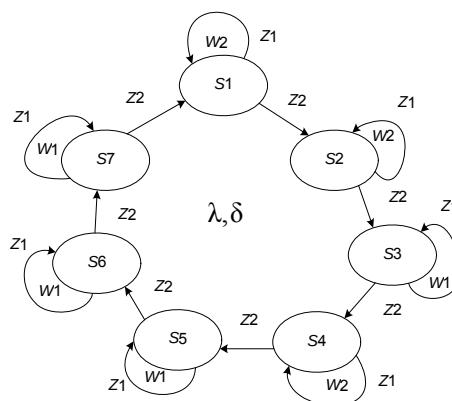


Рис. 2. Граф переходов и выходов (автоматная логика Мура): $Z_j, j = \overline{1,2}$ – элемент алфавита Z высокого уровня входов; $S_i, i = \overline{1,7}$ – элемент алфавита S высокого уровня состояний; $W_j, j = \overline{1,2}$ – элемент алфавита W высокого уровня выходов абстрактного представления проектируемого устройства

	$w(k)$	$w_2(k)$	$w_2(k)$	$w_1(k)$	$w_2(k)$	$w_1(k)$	$w_1(k)$	$w_1(k)$
	$s(k)$	$s_1(k)$	$s_2(k)$	$s_3(k)$	$s_4(k)$	$s_5(k)$	$s_6(k)$	$s_7(k)$
$z(k)$	$z_1(k)$	$s_1(k+1)$	$s_2(k+1)$	$s_3(k+1)$	$s_4(k+1)$	$s_5(k+1)$	$s_6(k+1)$	$s_7(k+1)$
	$z_2(k)$	$s_2(k+1)$	$s_3(k+1)$	$s_4(k+1)$	$s_5(k+1)$	$s_6(k+1)$	$s_7(k+1)$	$s_1(k+1)$

Таблица 1. Таблица переходов и выходов абстрактного представления

	U	$U = K\{Z\}$		Y	$Y = K\{W\}$		X	$X = K\{S\}$		
		u						y		x_1
Z	z_1	0	W	w_1	0	S	s_1	0	0	0
							s_2	0	0	1
							s_3	0	1	0
	z_2	1		w_2	1		s_4	0	1	1
							s_5	1	0	0
							s_6	1	0	1
							s_7	1	1	0

Таблица 2. Таблица кодирования алфавитов абстрактного представления

	$y(k)$	1	1	0	1	0	0	0
	$x(k)$	000	001	010	011	100	101	110
$u(k)$	0	000	001	010	011	100	101	110
	1	001	010	011	100	101	110	000
		$x(k+1) = \{x_1(k+1)x_2(k+1)x_3(k+1)\}$						

Таблица 3. Таблица переходов и выходов конечного автомата

7. проверку правильности функционирования, осуществляемую на базе гипотезы, что полученное устройство приведено в состояние $x(k) = x(4) = [100]^T$ и на его вход подается сигнал v_f принуждения изменения порядка (1) состояний НДДС на (3) в силу графов канонических переходов $u(k) = 1$. В этом случае должен обеспечиваться переход из состояния $x(4)$ в $x(0)$. Исходя из этого, имеем

$$x_{R1}(k+1) = u_{D1}(k) + \mathbf{B}_{c1}u_c = (1 \vee 0 \vee 0 \vee 0) + 1 = 0;$$

$$x_{R2}(k+1) = u_{D2}(k) + \mathbf{B}_{c2}u_c = (0 \vee 0 \vee 0 \vee 0) + 0 = 0;$$

$$x_{R3}(k+1) = u_{D3}(k) + \mathbf{B}_{c3}u_c = (0 \vee 1 \vee 0 \vee 0) + 1 = 0.$$

Таким образом, вектор требуемого состояния после коммутации структуры пространства имеет вид $x_R(k+1) = [000]^T$.

Заключение

Предложена комбинированная двоичная рекуррентная алгоритмическая среда, которая позволяет конструктивно расширить функциональные возможности нелинейных двоичных динамических систем, основанных на линейной коммутации структуры их пространства состояния. По мнению авторов, реализация предлагаемой среды обладает меньшей схемотехнической сложностью, чем традиционная автоматная среда, управляемая всей совокупностью возможных внешних сигналов. Этот выигрыш связан с тем, что в случае автоматной среды все конъюнкции, входящие в дизъюнкцию, формирующую процесс перехода из состояния в состояние, будут увеличены на число компонентов, равных внешним коммутирующим сигналам, чего не происходит в предлагаемой среде.

Литература

1. Баранов С.И. Синтез микропрограммных автоматов. – Л.: Энергия, 1979. – 232 с.
2. Бохман Д., Постхофф Х. Двоичные динамические системы. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 400 с.

3. Ушаков А.В., Яицкая Е.С. Двоичное динамическое наблюдение в задаче нелинейного формирования сигнала коммутации структуры пространства линейных устройств рекуррентного преобразования кодов // Проблемы управления и информатики. – 2012. – № 1. – С. 111–117.
4. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб: БХВ-Петербург, 2004. – 800 с.
5. Ушаков А.В., Яицкая Е.С. Анализ структуры пространства состояний линейных двоичных динамических систем на основе их рекуррентного модельного представления // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 4 (74). – С. 43–49.

Ушаков Анатолий Владимирович

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, ushakov-AVG@yandex.ru

Яицкая Елена Сергеевна

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, yaitskayaes@mail.ru

УДК 621.314.5:681.537

СИНХРОНИЗАЦИЯ ТРЕХФАЗНЫХ АКТИВНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ С ПИТАЮЩЕЙ СЕТЬЮ

П.А. Борисов, Н.А. Поляков

Рассмотрен способ реализации управления трехфазным активным выпрямителем напряжения с учетом необходимости синхронизации с питающей сетью в условиях неидеального сетевого напряжения с искажениями формы потребляемого тока. Проведено моделирование в пакете MATLAB/Simulink, подтвердившее работоспособность и энергетическую эффективность способа.

Ключевые слова: активный выпрямитель, векторное управление, фазовая автоподстройка частоты.

Введение

Активный выпрямитель напряжения (АВН) представляет собой автономный инвертор напряжения, выполненный на силовых ключах с обратными диодами и обращенный на сторону сети переменного тока, который обеспечивает двунаправленный обмен энергии между питающей сетью и потребителем. В принцип работы АВН заложен импульсный повышающий напряжение регулятор, поэтому он обязательно содержит в своем составе токоограничивающий дроссель, устанавливаемый на стороне переменного тока. Для обмена реактивной мощностью, включающей высшие гармоники, между первичной сетью и АВН используется конденсатор силового фильтра (СФ) звена постоянного тока (ЗПТ) [1].

На сегодняшний день существует несколько подходов к управлению активными выпрямителями напряжения, наиболее перспективными из которых являются алгоритмы векторного управления с преобразованием координат. Однако для промышленных устройств необходимо учитывать неидеальный характер самой питающей сети. В связи с этим для достижения энергетической эффективности систем с трехфазными АВН в информационной подсистеме преобразователя необходимо обеспечивать фазовую автоподстройку частоты (ФАПЧ) для синхронизации с фазой и частотой первой гармоники фазового напряжения. В основу предлагаемого способа реализации управления АВН заложена так называемая «силовая» ФАПЧ (Power Phase Locked Loop) [2, 3], где для синхронизации с фазой питающей сети используется фазовый детектор, реализованный на триггерах и маломощной схеме «зарядового насоса» (charge pump).

Преобразование координат

Для описания электромагнитных процессов в системах переменного тока используются следующие системы координат:

- неподвижная ортогональная система координат $\alpha\beta$;
- вращающаяся с произвольной угловой скоростью ω_k ортогональная система координат x_y [3, 4].

В неподвижной системе координат $\alpha\beta$ вектор тока может быть представлен в комплексной и показательной форме (1):

$$\bar{I}_H = I_\alpha + j I_\beta = I_m e^{j\psi} \quad (1)$$

Аналогично во вращающейся системе координат тот же вектор может быть представлен в виде

$$\bar{I}_{Bp} = I_x + j I_y = I_m e^{j(\psi - \omega_k t)} = \bar{I}_H e^{-j\omega_k t} \quad (2)$$

Из (1) и (2) можно получить уравнения для перехода от неподвижной системы координат к вращающейся и обратно (преобразования Парка–Горева). Если принять, что I_x и I_y – соответственно активная и реактивная составляющие обобщенного вектора сетевого тока и система синхронизирована относительно синусоиды электродвижущей силы (ЭДС) фазы A , то получим систему уравнений

$$i_{\alpha} = i_X \sin(\omega_k t) + i_Y \cos(\omega_k t), \quad (3)$$

$$i_{\beta} = -i_X \cos(\omega_k t) + i_Y \sin(\omega_k t). \quad (4)$$

Преобразование двухфазной неподвижной системы координат к трехфазной в этом случае осуществляется в соответствии с выражениями (преобразования Кларка)

$$i_A = i_{\alpha}; i_B = -(1/2)i_{\alpha} + (\sqrt{3}/2)i_{\beta}; i_C = -(1/2)i_{\alpha} - (\sqrt{3}/2)i_{\beta}. \quad (5)$$

С помощью преобразования координат появляется возможность управлять АВН по проекциям I_X и I_Y обобщенного вектора сетевого тока. На рис. 1 представлена модель системы управления, использующей этот принцип, в пакете MATLAB/Simulink. Положительным значениям I_Y соответствует режим потребления энергии из первичной сети, отрицательным – режим рекуперации. Таким образом, переход от двигательного режима в генераторный и обратно осуществляется в такой системе автоматически.

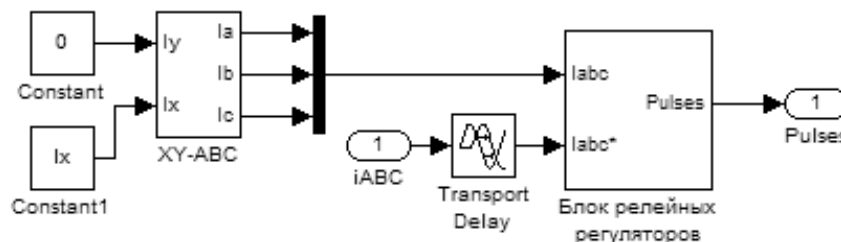


Рис. 1. Система управления АВН по проекциям обобщенного вектора сетевого тока

АВН с двухконтурной системой подчиненного регулирования

Двухконтурная система подчиненного регулирования АВН с разделным управлением по проекциям обобщенного вектора сетевого тока (внутренний контур тока) и внешним контуром стабилизации напряжения конденсатора СФ ЗПТ представлена на рис. 2. Помимо вышеперечисленных блоков, в систему входят пропорциональный регулятор (П-регулятор) контура стабилизации напряжения U_c конденсатора СФ ЗПТ и блок токоограничения. Блок токоограничения является обязательным элементом системы регулирования АВН, позволяя ограничить электромагнитные нагрузки на элементы АВН на заданном уровне.

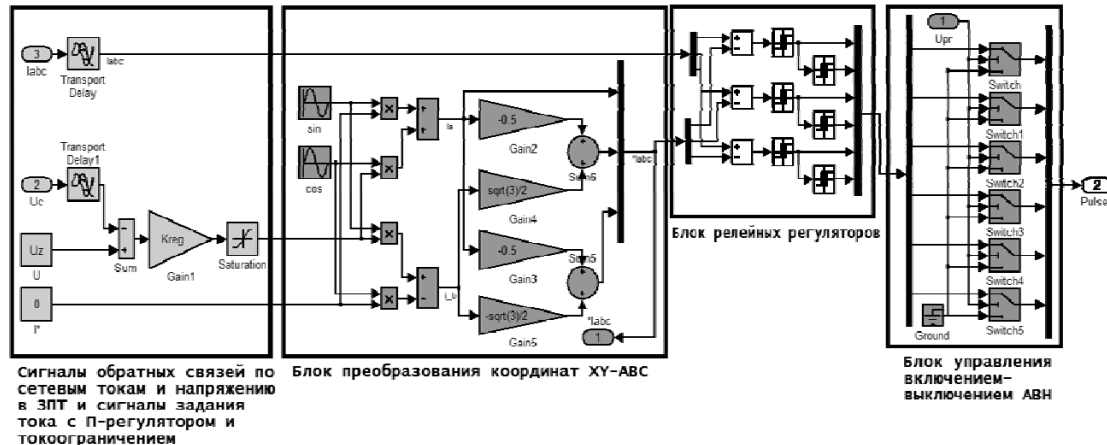


Рис. 2. Двухконтурная система подчиненного регулирования АВН

Блок преобразования координат $XY-ABC$ осуществляет преобразование проекций I_X и I_Y обобщенного вектора сетевого тока из вращающейся системы координат к трехфазной системе токов i_A , i_B , i_C в соответствии с формулами (3)–(5). Блок релейных регуляторов включает три канала, реализующих «токовый коридор», который является одним из способов обеспечения гармонической формы сетевых токов [5–7]. Блок управления включением/выключением АВН обеспечивает включение АВН в заданный момент времени.

Синхронизация фазы управления с фазой питающей сети

Непрерывная система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) сравнивает фазы эталонного и подстраиваемого генератора сигналов. Сигналы поступают на фазовый детектор (ФД), который выводит сигнал ошибки, соответствующий разности между этими фазами. Выходное напряжение ФД через фильтр нижних частот (ФНЧ) воздействует на генератор, управляемый напряжением (ГУН), включенный в обратную связь. Если выходная частота отклоняется от эталонной, то сигнал ошибки увеличивается,

воздействуя на ГУН в сторону уменьшения ошибки. В состоянии равновесия выходной сигнал фиксируется на частоте эталонного [8].

Необходимость введения ФАПЧ в систему управления АВН связана, прежде всего, с тем фактом, что присутствие несимметрии напряжений в питающей сети и искажения формы напряжения создают возмущения в системе управления, что приводит к появлению низкочастотных гармоник в составе формируемого АВН тока питающей сети [3].

В случае несинусоидального напряжения питающей сети управление следует синхронизировать с фазой его первой гармоники. Таким образом, даже при несинусоидальном напряжении тока, которые будут формировать АВН, должны совпадать по фазе с первой гармоникой фазного напряжения и иметь синусоидальную форму. При условии симметричности напряжений питающей сети достаточно синхронизировать АВН с двумя из трех фаз питающей сети.

Для решения этой задачи в систему управления АВН можно внедрить ФАПЧ (рис. 3, а) с цифровым ФД (ЦФД) на основе триггеров (рис. 3, б) и петлевой фильтр с «зарядовым насосом» (рис. 3, в). «Зарядовый насос» генерирует ток в петлевом фильтре 2-го порядка. Напряжение в ветви фильтра используется как входной сигнал ГУН. ЦФД определяет направление тока в петлевом фильтре, причем отрицательный знак тока соответствует опережению фазы, а положительный – отставанию фазы соответственно. Обычно ЦФД определяет моменты совпадения пересечения с нулем эталонного и подстраиваемого сигналов. Если эталонный сигнал достигает положительного значения раньше подстраиваемого (т.е. подстраиваемый сигнал отстает), то включается положительный «зарядовый насос», который сохраняется до тех пор, пока будет наблюдаться отставание вырабатываемого ГУН подстраиваемого сигнала от эталонного [2].

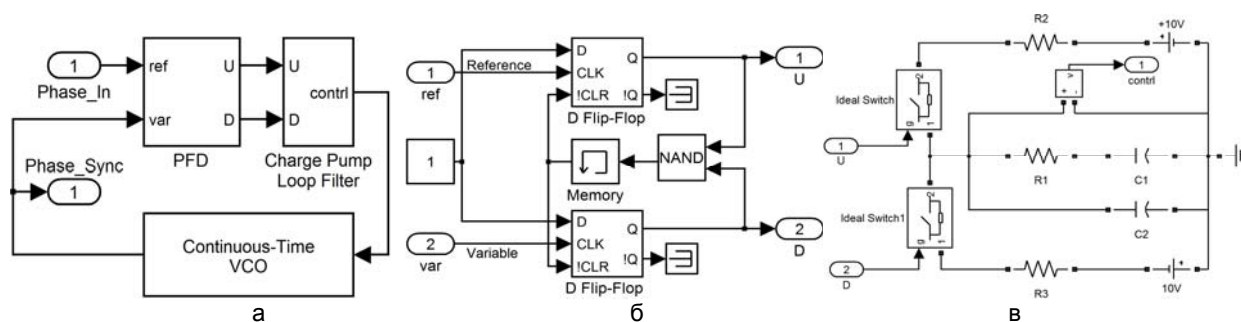


Рис. 3. Устройство блока ФАПЧ (а); ЦФД (б); зарядовый насос (в)

Передаточная функция фильтра будет иметь вид

$$G(p) = \frac{p \cdot R_1 \cdot C_1 + 1}{p^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 + p \cdot (C_1 + C_2)}, \quad (6)$$

где $C_2 = 17$ пФ; $C_1 = 82$ пФ; $R_1 = 23$ кОм.

Для проверки работоспособности такой ФАПЧ был использован сигнал, в состав которого были включены гармоники вплоть до 25-й в соответствии с [9]. Значения допустимых гармонических составляющих напряжения в процентах от первой гармоники приведены в таблице.

Нечетные гармоники, некрatные 3, при $U_{ном}$, кВ			Нечетные гармоники, кратные 3, при $U_{ном}$, кВ			Четные гармоники при $U_{ном}$, кВ		
Номер гармоники n	0,38	6–20	Номер гармоники n	0,38	6–20	Номер гармоники n	0,38	6–20
5	6,0	4,0	3	5,0	3,0	2	2,0	1,5
7	5,0	3,0	9	1,5	1,0	4	1,0	0,7
11	3,5	2,0	15	0,3	0,3	6	0,5	0,3
13	3,0	2,0	21	0,2	0,2	8	0,5	0,3
17	2,0	1,5	>21	0,2	0,2	10	0,5	0,3
19	1,5	1,0				12	0,2	0,2
23	1,5	1,0				>12	0,2	0,2
25	1,5	1,0						
>25	$0,2 + 1,3 \times 25/n$	$0,2 + 0,8 \times 25/n$						

Таблица. Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения в процентах

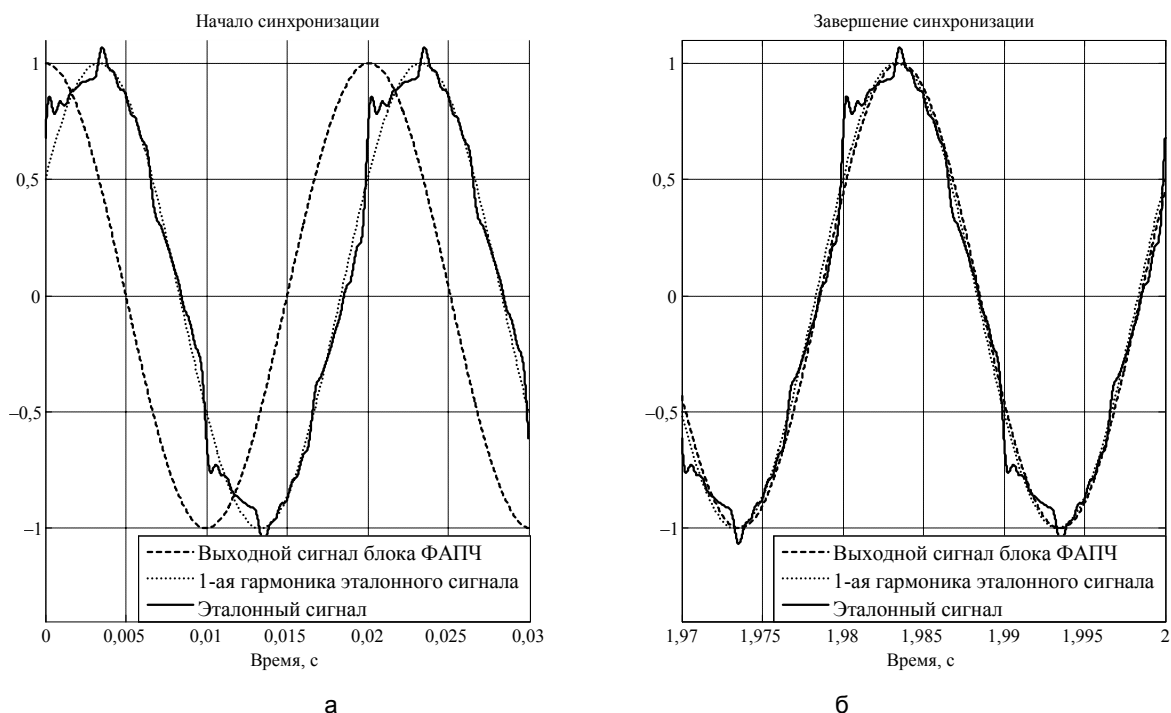


Рис. 4. Начало синхронизации (а); достижение синхронизации (б) (в относительных единицах)

Нормально допустимые значения, приведенные для n , равных 3 и 9, относятся к однофазным электрическим сетям. В трехфазных трехпроводных электрических сетях эти значения вдвое меньше приведенных в таблице. Результаты моделирования системы синхронизации с питающей сетью для случая соответствия сетевого напряжения требованиям [9] приведены на рис. 4. Блок ФАПЧ осуществляет синхронизацию сигнала задания с первой гармоникой сетевого напряжения за 2 с. Однако следует отметить, что полуторакратное превышение амплитуд высших гармоник в сетевом напряжении, т.е. при не соответствии требованиям [9], приводит к невозможности осуществить захват фазы.

Пример внедрения такой системы в структуру системы управления АВН приведен на рис. 5. Входным сигналом для блоков ФАПЧ служат значения напряжений в фазах u_A и u_B . Синхронизация с первой гармоникой напряжения третьей фазы u_C не требуется, поскольку синусоидальный сигнал задания третьей фазы C формируется на основе сигналов, вырабатываемых ФАПЧ для фаз A и B . Амплитуда задания формируется на основе обратной связи по напряжению в ЗПТ. В ней также учитывается токоограничение и дискретизация сигнала задания с частотой 1 кГц.

В данном случае преобразование координат $XY-ABC$ не требуется, так как за счет синхронизации по фазе с напряжением питающей сети автоматически обеспечивается режим, в котором реактивная составляющая полной мощности отсутствует. За счет этого снижаются требования к вычислительным ресурсам микроконтроллера. Таким образом, в отличие от управления АВН по проекциям обобщенного вектора сетевого тока [10], преобразование сводится к формированию сигнала задания тока третьей фазы на основе синхронизированного задания первой и второй фазы.

Результаты моделирования приведены на рис. 6.

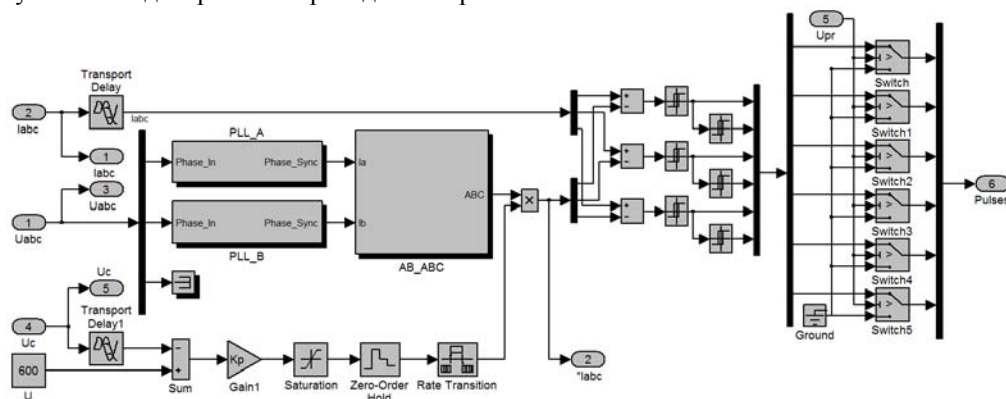


Рис. 5. Блок управления АВН с синхронизацией с фазными напряжениями

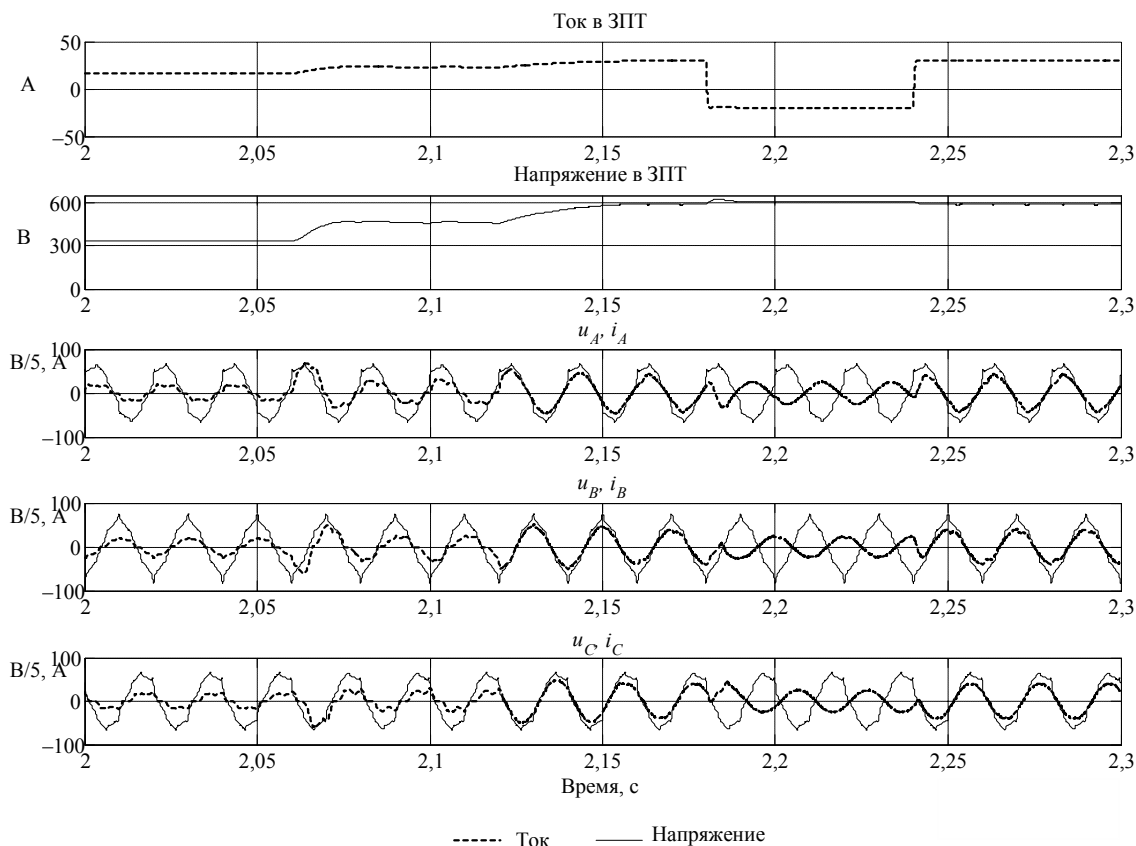


Рис. 6. Результаты моделирования электромагнитных процессов в АВН: (сверху – вниз) ток в ЗПТ, А; напряжение в ЗПТ, В; u_A , В/5, i_A , А; u_B , В/5, i_B , А; u_C , В/5, i_C , А

Система синхронизируется с питающей сетью в течение первых двух секунд, процесс синхронизации не отличается от рассмотренного ранее. При пуске ток заряда конденсатора СФ протекает через неуправляемый выпрямитель, структурно входящий в схему АВН, в результате при пуске наблюдаются процессы, характерные для традиционных выпрямителей [11]. При моделировании в момент времени $t = 2,06$ с шунтируются пусковые резисторы. АВН вступает в работу в момент $t = 2,12$ с, при этом ЭДС нагрузки равна нулю. АВН переходит из режима потребления энергии в режим рекуперации при $t = 2,18$ с, когда с блока «Repeating Sequence» подается противоЭДС нагрузки, равная 1000 В. АВН возвращается в режим потребления энергии из первичной сети в момент $t = 2,24$ с, когда противоЭДС нагрузки становится равной нулю.

Заключение

Проведенное моделирование подтверждает работоспособность предложенной системы управления активного выпрямителя напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты с «зарядовым насосом» в условиях питающей сети, соответствующей требованиям [9]. Показано, что в такой системе отсутствует реактивная составляющая полной мощности, как и в случае с работой активного выпрямителя напряжения в идеальной сети. При этом за счет применения фазовой автоподстройки частоты из управления может быть исключено преобразование координат $XY-ABC$.

Следует отметить, что такая система работоспособна только при условии соответствия гармонического состава напряжений в фазах питающей сети требованиям [9]. Значительное увеличение амплитуд высших гармоник относительно первой приводит к невозможности захвата фазы и неустойчивости системы управления активного выпрямителя напряжения.

Литература

1. Борисов П.А., Седнев А.К. Математическое моделирование электропривода постоянного тока с активным выпрямителем // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 3 (61). – С. 35–41.
2. Giorgia Zucchelli. Phase Locked Loop tutorial – MATLAB Central, 2007 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/14868-phase-locked-loop-tutorial>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 20.01.2012).

3. Mongkol Konghirun. A Three-Phase Space-Vector Based PWM Rectifier with Power Factor Control // Power Conversion Conference. – Nagoya, 2007. – P. 57–61.
4. Усольцев А.А. Общая электротехника: Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 301 с.
5. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями: Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
6. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – Ч. 2. – 197 с.
7. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – М.: Академия, 2006. – 272 с.
8. Акимов В.Н. Системы фазовой синхронизации. – М.: Радио и связь, 1982. – 288 с.
9. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Электромагнитная совместимость. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 01.01.1999. – М.: Госстандарт, 1998. – 33 с.
10. Борисов П.А., Киреев А.А., Поляков Н.А. Моделирование системы управления трехфазным активным выпрямителем напряжения с преобразованием координат // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2010. – Вып. 3. – Ч. 2. – С. 59–64.
11. Борисов П.А., Томасов В.С. Моделирование и анализ электромагнитных процессов в силовых цепях активных выпрямителей напряжения // Труды V Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение» (МКЭЭЭ-2003). – Ч. I. – Крым, Алушта, 2003. – С. 727–730.

Борисов Павел Александрович

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, borisov@ets.ifmo.ru

Поляков Николай Александрович

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, Polyakov.n.a@gmail.com

УДК 62.503.51, 62.503.54, 62.503.55.

СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ, МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С МАШИНОЙ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ И ПРЯМЫМ УПРАВЛЕНИЕМ МОМЕНТОМ

А.С. Ляпин

Представлены основные особенности и преимущества электропривода с машиной двойного питания. Разработана структурная модель и получены динамические характеристики электропривода с машиной двойного питания и прямым управлением моментом.

Ключевые слова: электропривод, машина двойного питания, прямое управление моментом, структурная модель.

Введение

Длительное время основной тенденцией развития электроприводной техники является замена ненадежного, дорогого и сложного в обслуживании привода постоянного тока частотно-регулируемым асинхронным электроприводом. Это обусловлено такими достоинствами асинхронного электропривода, как высокая надежность, простая конструкция, низкая стоимость, высокие динамические и энергетические показатели [1, 2]. В настоящее время, благодаря новым алгоритмам управления, которые удастся реализовать на базе современной микропроцессорной техники, а также интенсивному развитию устройств силовой электроники асинхронный электропривод стал главным типом регулируемого электропривода [3].

Для частотно управляемых электроприводов с асинхронным двигателем (АД) с короткозамкнутым ротором большой мощности альтернативой является использование привода на основе АД с фазным ротором (иначе, машины двойного питания (МДП)). Такой тип ротора был разработан русским электротехником, основоположником техники трехфазного тока М.О. Доливо-Добровольским специально для асинхронных двигателей большой мощности [4]. Преимущества электропривода с машиной двойного питания (ЭМДП) обусловлены тем, что управление осуществляется по цепи ротора путем изменения мощности скольжения, величина которой зависит от глубины регулирования скорости. Структурная схема ЭМДП представлена на рис. 1. При соответствующей реализации ЭМДП может работать как в двигательном, так и в генераторном режимах. ЭМДП при использовании его в качестве исполнительного механизма (двигательный режим) обладает рядом существенных достоинств по сравнению с другими типами современных приводов, а именно:

- высокое быстродействие;
- возможность регулирования реактивной мощности в питающей сети;

- возможность поддержания оптимального коэффициента мощности привода при изменении нагрузки;
- возможность реализации двухзонного регулирования угловой скорости, в том числе выше синхронной.

При работе ЭМДП в качестве генератора он имеет следующие существенные преимущества:

- возможность стабилизации выходного напряжения (амплитуды и частоты) при непостоянной скорости вращения вала генератора путем изменения параметров напряжения питания роторных обмоток;
- мощность управления и полупроводникового преобразователя (ПП на рис. 1) меньше мощности преобразуемой машиной и зависит от диапазона регулирования скорости вращения ротора;
- высокий КПД;
- возможность регулирования коэффициента мощности в сети.

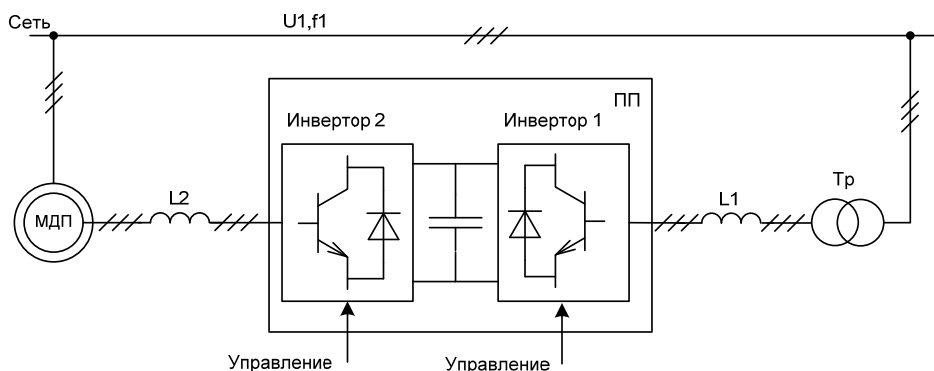


Рис. 1. Структурная схема ЭМДП

Наиболее целесообразно применение генераторов на основе ЭМДП большой мощности в случаях, в которых подводимая к ротору механическая энергия изменяется в процессе работы в ограниченных пределах, например, в возобновляемых источниках энергии (ветрогенераторы, гидрогенераторы), валогенераторных установках, нагрузочных устройствах двигателей внутреннего сгорания.

Электропривод с МДП еще не получил широкого распространения в отечественной промышленности. Приведенные выше преимущества показывают перспективность его внедрения. Однако прежде необходимо произвести более глубокие теоретические и практические изыскания с применением современных программных и аппаратных решений.

Целью работы является получение и анализ электропривода с машиной двойного питания и прямым управлением моментом по цепи ротора. Предложена структурная схема электропривода в пакете Matlab Simulink.

Математическое описание асинхронного ЭМДП с прямым управлением моментом

При разработке структурной модели ЭМДП за основу возьмем систему уравнений, записанную в произвольно вращающейся системе координат ω_k с использованием метода обобщенного (пространственного) вектора [5]:

$$\begin{aligned} U_1 &= R_1 i_1 + \frac{d\psi_1}{dt} + j\omega_k \psi_1; \\ U_2 &= R_2 i_2 + \frac{d\psi_2}{dt} + j(\omega_k - p\omega) \psi_2; \\ \psi_1 &= L_1 i_1 + L_m i_2; \\ \psi_2 &= L_2 i_2 + L_m i_1, \end{aligned} \quad (1)$$

где U_1, U_2 – векторы напряжений статора и ротора; ψ_1, i_1, ψ_2, i_2 – векторы потокосцеплений, токов статора и ротора; R_1, L_1, R_2, L_2 – активные сопротивление и индуктивность статора и ротора соответственно; L_m – главная индуктивность намагничивающего контура; ω_k – угловая скорость вращения системы координат; ω – угловая скорость вращения ротора; p – число пар полюсов машины.

Адаптированный для ЭМДП метод прямого управления моментом (DTC – direct torque control) осуществляется регулированием модуля и пространственного положения вектора потокосцепления ψ_2 путем изменения его проекций ψ_{2x}, ψ_{2y} . Для упрощения математического описания и реализации прямого управления моментом целесообразно ориентировать систему координат ω_k по вектору ψ_1 ($\psi_{1x} = 0$).

С учетом принятой ориентации системы координат выполним преобразование системы уравнений (1). Полученную систему дополним уравнениями равновесия моментов, выражением электромагнитного момента, записанного через выбранные переменные состояния, и уравнениями, связывающими модули векторов напряжения статора, потокосцепления ротора и их проекции на оси координат. В результате получим систему уравнений, описывающую протекающие электромагнитные процессы в МДП:

$$\begin{aligned}\omega_k &= \frac{-u_{1x} - \frac{k_2}{T_1\sigma}\psi_{2x}}{\psi_{1y}}; \\ u_{1y} &= \frac{1}{T_1\sigma}\psi_{2y} - \frac{k_2}{T_1\sigma}\psi_{2y}; \\ \frac{d\psi_{2x}}{dt} &= u_{2x} - A\psi_{2x} + [\omega_k - p\omega]\psi_{2y}; \\ \frac{d\psi_{2y}}{dt} &= u_{2y} - A\psi_{2y} + \frac{k_1}{T_2\sigma}\psi_{1y} - [\omega_k - p\omega]\psi_{2x}; \\ u_{1x} &= \sqrt{|\mathbf{U}_1|^2 - u_{1y}^2}; \\ \psi_{2y} &= \sqrt{|\boldsymbol{\Psi}_2|^2 - \psi_{2x}^2}; \\ |\boldsymbol{\Psi}_1| &= \psi_{1y} = \text{const}; \\ M &= C\psi_{1y}\psi_{2x}; \\ J \frac{d\omega}{dt} &= (M - M_n).\end{aligned}\tag{2}$$

В системе (2) приняты следующие обозначения:

$$T_1 = \frac{L_1}{R_1}, T_2 = \frac{L_2}{R_2}, k_1 = \frac{L_m}{L_1}, k_2 = \frac{L_m}{L_2}, \sigma = 1 - k_1k_2, A = \frac{1}{T_2\sigma}, C = \frac{3}{2} \frac{k_1p}{\sigma L_1}.$$

Структурная модель ЭМДП с прямым управлением моментом и его динамические характеристики

Для разрабатываемой модели необходимо синтезировать реализующую метод прямого управления момента систему управления, которая будет формировать напряжения питания обмоток ротора. Такая система должна иметь два отдельных канала управления. Один канал содержит релейный регулятор и осуществляет стабилизацию модуля вектора потокосцепления ротора, величина которого задается на входе канала. Второй канал, помимо релейного, содержит пропорциональный (П) или пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор, который по сигналу скоростной ошибки формирует сигнал задания электромагнитного момента ЭМДП. По значению ошибки момента, полученному в результате сравнения заданного и текущего электромагнитного момента, релейным регулятором определяется величина соответствующей проекции вектора напряжения ротора.

С учетом перечисленных положений и системы уравнений (2) в пакете Simulink разработана структурная модель ЭМДП (для двигателя 20HP (15 kW 400V 50Hz $T_1=0,3032$ с, $T_2=0,2952$ с, $J=0,102$ кг·м²) из библиотеки пакета SimPower System). Разработанная модель представлена на рис. 2. В модели для увеличения скорости моделирования релейные блоки представлены последовательным соединением блоков усиления с большим коэффициентом передачи и насыщения.

В части 1 модели реализованы четвертое и шестое уравнения системы (2), на вход подается сигнал задания модуля вектора потокосцепления ротора. В части 2 на вход модели поступает сигнал задания скорости вращения ротора машины и реализуются вычисления согласно третьему, восьмому и девятому уравнениям. В части 3 на вход модели подается вектор напряжения питания статора и выполняются вычисления в соответствии с незадействованными уравнениями системы (2).

На рис. 3, 4 приведены результаты моделирования, полученные на разработанной структурной модели электропривода с машиной двойного питания.

По переходным процессам в ЭМДП при скачкообразном управляющем воздействии видно, что момент изменяется практически скачком (нижняя диаграмма), это свидетельствует о высоком быстродействии исследуемого электропривода. В момент времени 0,6 с к валу прикладывается момент нагрузки. Как видно из графиков, обработка этого возмущающего воздействия выполняется без запаздывания.

При использовании ПИ-регулятора в канале формирования заданного момента переходный процесс протекает с небольшим перерегулированием, и скоростная ошибка, вызванная приложенным внешним моментом, интегральной составляющей регулятора сводится к нулю.

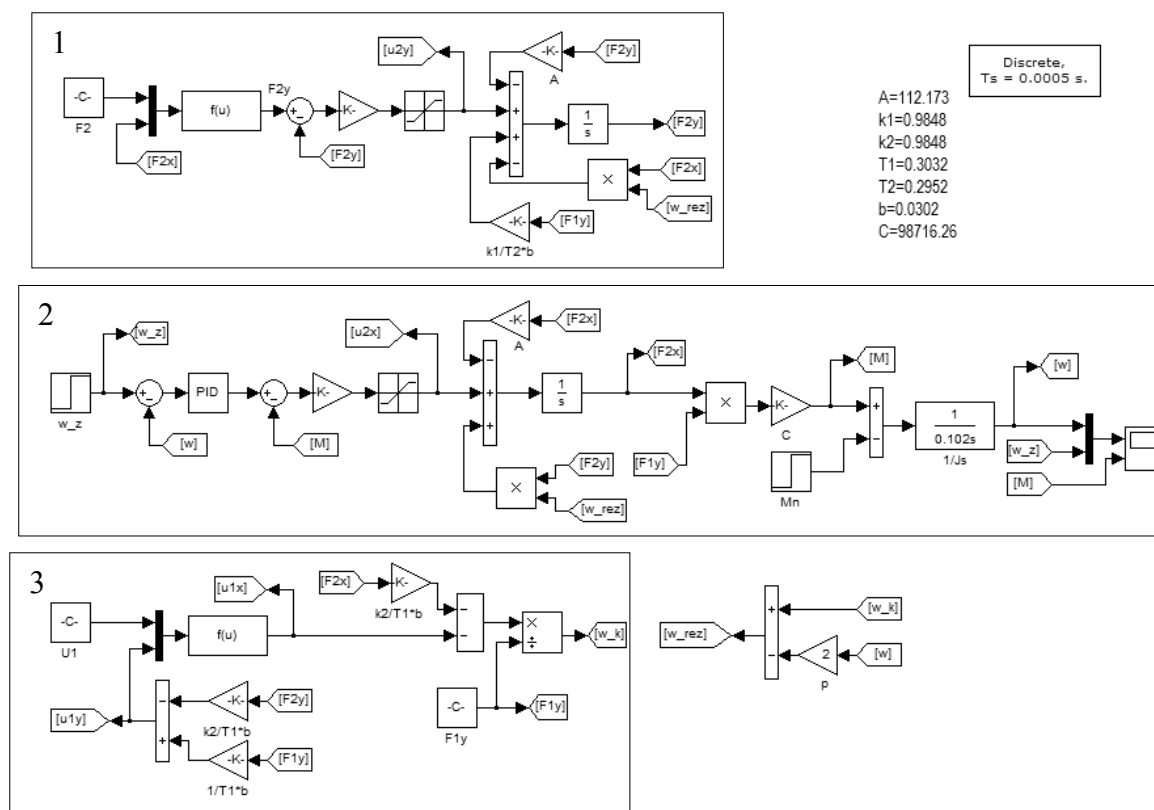


Рис. 2. Структурная модель ЭМДП с DTC управления

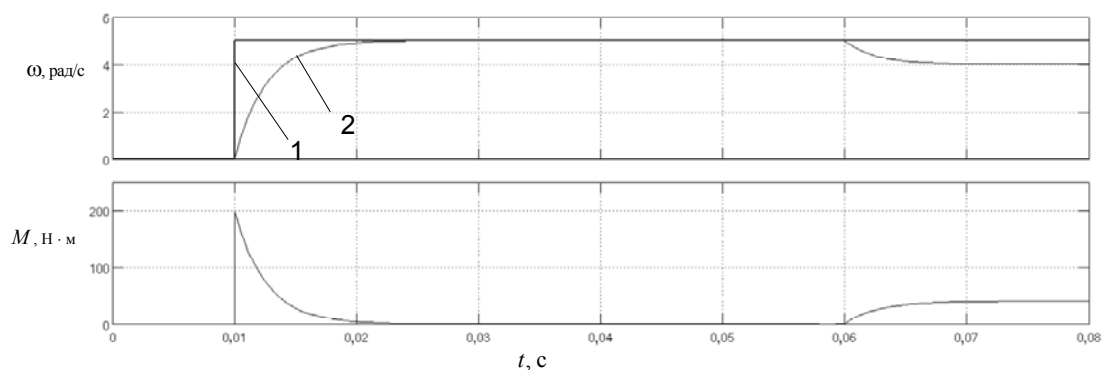


Рис. 3. Переходный процесс в ЭМДП с DTC-управлением (с П-регулятором): 1 – сигнал задания скорости; 2 – фактическая скорость

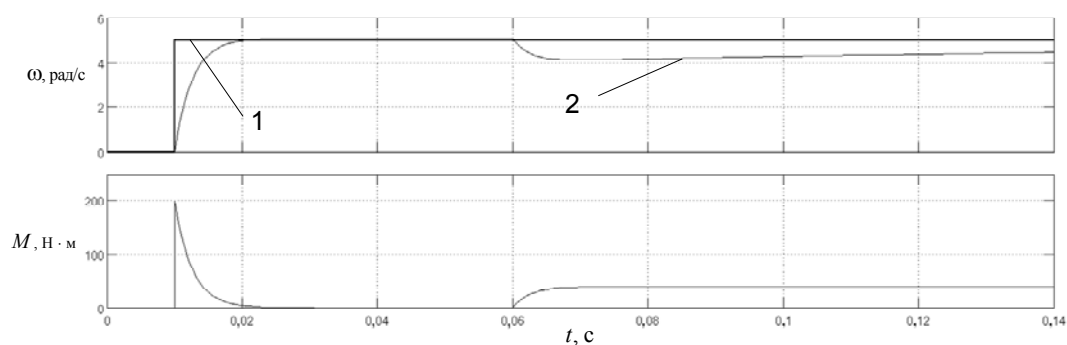


Рис. 4. Переходный процесс в ЭМДП с DTC-управлением (с ПИ-регулятором): 1 – сигнал задания скорости; 2 – фактическая скорость

Заключение

Рассмотренная в данной работе структурная модель электропривода с машиной двойного питания с прямым управлением моментом позволяет получить необходимые динамические характеристики и является базой для создания более сложной виртуальной модели, учитывающей более полно протекающие процессы в элементах привода. На виртуальной модели могут быть получены статические характеристики и более детально проанализированы особенности работы исследуемого электропривода.

Литература

1. Соколовский Г.Г. Электропривод переменного тока с частотным регулированием. – М.: ACADEMIA, 2006. – 265 с.
2. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
3. Козярук А.Е., Рудаков В.В. Современное состояние и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов. – СПб: СПЭК, 2004. – 64 с.
4. Белькинд Л.Д., Конфедератов И.Я., Шнейберг Я.А. История техники – М.: – Л.: ГЭИ, 1956. – 493 с.
5. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб: Корона-Век, 2008. – 368 с.

Ляпин Анатолий Сергеевич

– Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, аспирант, swatin1@rambler.ru

УДК 681.88

ИМИТАТОР СИГНАЛОВ НА ВЫХОДЕ ПРИЕМНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПАССИВНОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ С ГИБКОЙ ПРОТЯЖЕННОЙ БУКСИРУЕМОЙ АНТЕННОЙ

Ю.В. Шафранюк

Предложена математическая модель имитатора сигналов на выходе приемных элементов гибкой протяженной буксируемой антенны, учитывающая особенности излучения, распространения и приема сигналов и помех в реальных морских условиях. Приводятся требования к имитатору. Предлагается общая схема и принцип построения. На примере имитационных данных иллюстрируется его работоспособность.

Ключевые слова: гидроакустика, пассивные гидроакустические станции, антенны, многолучевое распространение, имитация.

Введение

Пассивные гидроакустические станции с гибкими протяженными буксируемыми антеннами (ГАС с ГПБА) являются одними из основных информационных систем освещения подводной обстановки и позволяют на достаточно больших дальностях осуществлять обнаружение подводных объектов [1]. Наиболее сложными задачами, решаемыми в ГАС с ГПБА, являются обнаружение шумящих объектов, их классификация и определение координат и параметров движения. Создание эффективных алгоритмов, решающих эти задачи, представляет большой научный и практический интерес.

Поскольку такие алгоритмы отличаются высокой сложностью, одним из основных этапов их проектирования является их отработка на модельных данных, учитывающих особенности излучения, распространения и приема сигналов и помех в реальных морских условиях.

Целью работы являлась разработка имитатора, обеспечивающего моделирование (имитацию) смеси сигналов и помех на выходе приемных элементов ГПБА в интересах отработки алгоритмов классификации и определения координат и параметров движения обнаруженных объектов. Научная новизна разработанного имитатора заключается в учете всех значимых факторов, влияющих на эффективность функционирования ГАС с ГПБА, в первую очередь, особенностей распространения сигнала цели в реальной морской среде.

Требования к имитатору

Для обеспечения адекватной отработки алгоритмов обнаружения, классификации и определения координат и параметров движения шумящих объектов в реальных морских условиях имитатор должен учитывать:

- конструкцию ГПБА (ее длину, количество приемных элементов, расстояние между ними, рабочий диапазон частот) [1];
- особенности маневрирования и шумоизлучения морских объектов (скорость, курс, глубина, уровень и спектр шумоизлучения в рабочем диапазоне частот в функции скорости объекта, параметры дискрет-

- ных составляющих в спектре шумоизлучения, обусловленные работой корабельных механизмов, параметры амплитудной вально-лопастной модуляции шума цели, а также модуляции вследствие качки на волнении) [2–4];
- особенности распространения сигнала цели в реальной морской среде (пространственное затухание, многолучевость и аномалию распространения) [5];
 - четырехкомпонентную модель распределенной помехи (шумы моря, шумы носителя, гидродинамические шумы обтекания ГПБА, шумы удаленного судоходства) [3, 5];
 - особенности преобразования сигнала в приемных каналах антенны [6, 7].

Структура имитатора

С учетом перечисленных требований была предложена структура имитатора, изображенная в виде блок-схемы на рис. 1. Ниже приводится описание блоков имитатора.

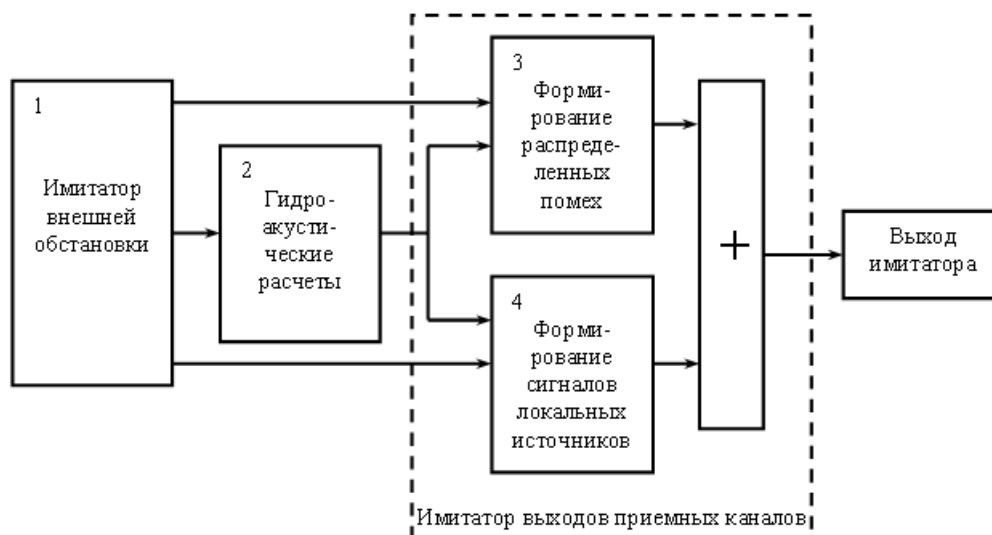


Рис. 1. Структура имитатора

Блок 1. Имитатор внешней обстановки. Блок позволяет задать произвольный тестовый эпизод, описываемый:

- конструктивными параметрами ГПБА (см. выше), спектром гидродинамической помехи в функции скорости буксировки;
- начальным расположением носителя ГАС с ГПБА и произвольного числа объектов произвольных классов и их движением по произвольным траекториям;
- спектром сигнала каждого моделируемого объекта (включая носитель ГАС с ГПБА) и спектром его амплитудной огибающей;
- гидроакустическими условиями, характеризующимися глубиной района, вертикальным распределением скорости звука, волнением поверхности моря, частотной и угловой зависимостью коэффициента отражения акустического сигнала от дна, частотной зависимостью пространственного затухания сигнала, спектром шумов моря, спектром шумов удаленного судоходства.

Имитатор внешней обстановки с заданным шагом по времени (как правило, 1 с) выдает текущее относительное (относительно носителя ГАС с ГПБА) положение всех объектов, их параметры движения. Он также синхронизирует работу всех остальных блоков.

Блок 2. Гидроакустические расчеты. В блоке на моменты времени, генерируемые в блоке 1, рассчитываются параметры сигнала каждого объекта и всех видов помех на входе ГПБА. Расчет осуществляется по специальной программе гидроакустических расчетов, учитывающей распространение акустических сигналов и помех в реальном морском волноводе [5].

Блок 3. Формирование распределенных помех. В блоке производится расчет воздействия на приемные элементы антенны помеховой составляющей акустического поля и формирование распределенных помех на выходе антенны.

Блок 4. Формирование сигналов локальных источников. В блоке производится вычисление параметров сигнала от локальных источников на входе антенны и формирование сигналов от локальных источников, приведенных к выходу каждого приемного элемента ГПБА (с учетом временного сдвига, зависящего от направления прихода сигнала на антенну).

Полученный сигнал от локального источника суммируется с сигналами от других источников и помехой на выходе текущего приемного элемента, затем подвергается дискретизации и усиливается, со-

гласно амплитудно-частотной характеристике усиления приемного тракта антенны. В итоге формируется цифровой сигнал с выхода элементарного приемного канала во временной области. Все программное обеспечение имитатора написано на языке программирования C++ в стандарте ANSI.

Ниже приведены математические модели, предложенные автором, для реализации блока 3 и блока 4 имитатора.

Метод формирования распределенных помех

Особенность моделирования сигналов локальных источников и распределенных помех состоит в том, что сигналы локальных источников можно считать плосковолновыми и, как следствие, полностью коррелированными на входе приемных элементов ГПБА (с учетом временного сдвига, зависящего от направления прихода сигнала на антенну), а коэффициент корреляции распределенных помех зависит от частоты f , расстояния между элементами антенны d и скорости звука в воде c по формуле

$$r_{pn} = \frac{\sin \frac{2\pi f d}{c}}{\frac{2\pi f d}{c}}.$$

В связи с этим предлагается следующая математическая модель, описывающая шумовую помеху в частотной области:

$$S_{cltr}(i_f, i_{SR}) = \begin{cases} S(i_f) \cdot \text{norm}(0, 1), & i_{SR} = 1 \\ S(i_f) \cdot \text{norm}\left(\frac{r_{pn}}{S_{cltr}(i_f, i_{SR})} S_{cltr}(i_f, i_{SR} - 1), \sqrt{1 - r_{pn}^2}\right), & i_{SR} > 1 \end{cases},$$

$$S(i_f) = P_{smo} \left(\frac{f(i_f)}{f_0} \right)^{-2} + P_{ngb} \left(\frac{f(i_f)}{f_0} \right)^{-4},$$

где $i_f = \overline{1, N_f}$ – индекс частотного отсчета; $f(i_f)$ – рабочие частоты ГПБА, Гц; P_{smo} – приведенный к частоте 1 кГц уровень шумов моря, мПа·мПа; P_{ngb} – приведенный к частоте 1 кГц уровень гидродинамической помехи, мПа·мПа; f_0 – частота приведения, Гц; i_{SR} – индекс приемного элемента ГПБА; $\text{norm}(\bullet, \bullet)$ – функция плотности распределения вероятности для случая гауссового распределения (первый аргумент – математическое ожидание, второй – среднеквадратическое отклонение). Для получения шумовой помехи во временной области используется обратное преобразование Фурье.

Метод формирования сигналов от локальных источников

Сигнал от каждого локального источника, приведенный к входу антенны, моделируется по следующей формуле [3]:

$$u(t_i) = \sum_{i_{ray}=1}^{N_{ray}} \left[P_{noise}(i_{ray}) u_{noise}(t_i + \Delta t(i_{ray})) (1 + u_M(t_i + \Delta t(i_{ray}))) + u_{DS}(t_i + \Delta t(i_{ray}), i_{ray}) \right],$$

где t_i – временной отсчет; $u(t_i)$ – t_i -й отсчет сигнала; i_{ray} – индекс луча; N_{ray} – число лучей; $u_{noise}(t_i + \Delta t(i_{ray}))$ – t_i -й отсчет широкополосной составляющей сигнала объекта с заданным наклоном спектра, моделируемый датчиком нормально распределенных случайных чисел с нулевым математическим ожиданием и единичным среднеквадратическим отклонением; $P_{noise}(i_{ray})$ – уровень широкополосной составляющей сигнала объекта, Па; $\Delta t(i_{ray})$ – временная разница в набеге i_{ray} -го луча, с; $u_M(t_i + \Delta t(i_{ray}))$ – модулирующая часть сигнала; $u_{DS}(t_i + \Delta t(i_{ray}), i_{ray})$ – полигармоническая часть сигнала (дискретная часть спектра).

Модулирующая составляющая сигнала моделируется по формуле [4]

$$u_M(t_i) = \sum_{i_M=1}^{N_M} \left[k_M(i_M) \cos(2\pi f_M(i_M) t_i + \Delta \phi_M) \right], \Delta \phi_M = \text{norm}(0, 2\pi \Delta f_M(i_M) / f_M(i_M)),$$

где i_M – индекс гармоник; N_M – число гармоник; $k_M(i_M)$ – коэффициент модуляции для i_M -й гармоники модулирующего сигнала; $f_M(i_M)$ – частота i_M -й гармоники модулирующего сигнала, Гц; $\Delta \phi_M$ –

случайная фаза i_M -й гармоники; $\Delta f_M(i_M)$ – ширина i_M -й гармоники. Полигармоническая составляющая сигнала моделируется по формуле

$$u_{DS}(t, i_{ray}) = \sum_{i_{DS}=1}^{N_{DS}} [P(i_{DS}, i_{ray}) \cos(2\pi f_{DS}(i_{DS})t + \Delta\varphi_{DS})],$$

$$P_{DS}(i_{DS}, i_{ray}) = P_{DS}^*(i_{DS}) \frac{10^{-0,05\beta R-6} A(i_{ray})}{R},$$

$$\Delta\varphi_{DS} = \text{norm}(0, 2\pi\Delta f_{DS}(i_{DS})/f_{DS}(i_{DS})),$$

где i_{DS} – индекс гармоники; N_{DS} – число гармоник; $P(i_{DS}, i_{ray})$ – уровень i_{DS} -й гармоники полигармонического сигнала, приведенный ко входу антенны, Па; $P_{DS}^*(i_{DS})$ – уровень i_{DS} -й гармоники полигармонической составляющей сигнала в точке излучения, Па; $A(i_{ray})$ – аномалия распространения для i_{ray} -го луча от объекта; R – расстояние до объекта в горизонтальной плоскости, км; $\beta = a + b(f_{avg}/f_0)^c$ – коэффициент пространственного затухания; a , b , c – эмпирические коэффициенты модели пространственного затухания, взятые для среднегеометрической частоты диапазона спектрального анализа – $f_{avg} = \sqrt{f_{high} \cdot f_{low}}$, где f_{low} – нижняя частота спектрального диапазона, а f_{high} – верхняя; $f_{DS}(i_{DS})$ – частота i_{DS} -й гармоники полигармонического сигнала, Гц; $\Delta\varphi_{DS}$ – случайная фаза i_{DS} -й гармоники; где $\Delta f_{DS}(i_{DS})$ – ширина i_{DS} -й гармоники. Уровень широкополосной составляющей сигнала для каждого объекта на входе антенны вычисляется на основе данных помехо-сигнальной обстановки по следующей формуле:

$$P_{noise}(i_{ray}) = P_{noise}^*(i_{ray}) \frac{f_0}{f_{avg}} \sqrt{f_{high} - f_{low}} \frac{10^{-0,05\beta R-6} A(i_{ray})}{R},$$

где $P_{noise}^*(i_{ray})$ – приведенный уровень широкополосной составляющей сигнала в точке излучения, Па/√Гц.

Результаты тестирования имитатора

С целью проверки работоспособности имитатора были проведены проверки по следующим параметрам:

- приведенная мощность помехи на входе антенны;
- наклон сплошной части спектра помехи;
- частоты формирования дискретных составляющих (ДС) в спектре сигнала;
- частоты формирования амплитудных огибающих (АО) в спектре сигнала.

Для проведения проверок были составлены эпизоды, имитирующие взаимное положение носителя ГАС и объектов. При этом взаимное положение объектов описывалось на плоскости с помощью галсов, где галс характеризовался равномерным прямолинейным движением. Длительность каждого эпизода составляла 10 мин.

В табл. 1 приведены описания тестовых эпизодов. Эпизод 1 позволяет провести первые две проверки – проверки приведенной мощности помехи и наклона сплошной части помехи. В свою очередь, эпизод 2, имитирующий один объект, позволяет проверить частоты формирования ДС в спектре сигнала и его АО.

Номер эпизода	Число объектов	Описание поведения объекта					Описание поведения носителя ГАС				
		Координаты		Курс, град	Скорость, узлов	Глубина, м	Координаты		Курс, град	Скорость, узлов	Глубина, м
		X, км	Y, км				X, км	Y, км			
1	0	–	–	–	–	–	0	0	0	0	100
2	1	–10	17,5	90	10	5	0	0	–90	0	100

Таблица 1. Описание тестовых эпизодов

В табл. 2 приведены полученное и заданное значения давления на входе антенны. Как видно из табл. 2, разность полученного и заданного значения давления не превышает 0,01 дБ, что вполне допустимо для практических приложений. Это позволяет сделать вывод, что проверка приведенной мощности помехи на входе антенны прошла успешно.

Моделируемое значение давления, дБ	35,56
Измеренное значение давления, дБ	35,57
Разность, дБ	0,01

Таблица 2. Результаты проверки давления на входе антенны

Ниже представлены результаты проверки величины наклона сплошной части спектра помехи. На рис. 2 изображен график зависимости наклона сплошной части спектра помехи от частоты в октавах (единица измерения частотного диапазона; 1 октава соответствует интервалу между частотами, логарифм отношения которых при основании 2 равен 1).

В табл. 3 приведены полученное и заданное значения наклона спектра на входе антенны. Нетрудно видеть, что разность заданного и полученного значений наклона спектра помехи не превышает 0,04 дБ, что вполне допустимо для практических приложений. Следовательно, проверка прошла успешно.

Моделируемое значение наклона спектра, дБ/октава	-6,0
Измеренное значение наклона спектра, дБ/октава	-6,04
Разность, дБ	-0,04

Таблица 3. Результаты проверки наклона спектра на входе антенны

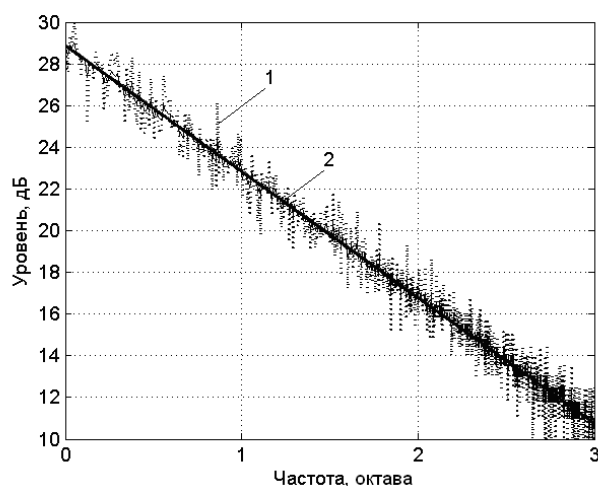


Рис. 2. Оценка наклона спектра: 1 – спектр сигнала; 2 – оценка наклона спектра

Измеренная частота ДС, Гц	Моделируемая частота ДС, Гц	Разность, Гц
50,05	51,0	-0,95
68,0	69,0	-1,0
101,1	102,0	-0,9
313,15	314,0	-1,15

Таблица 4. Результаты проверки частот формирования ДС в спектре сигнала

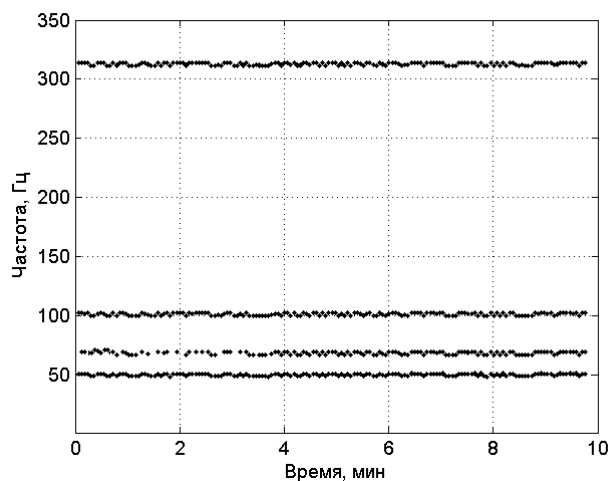


Рис. 3. Зависимость частоты ДС от времени

В табл. 4 приведены результаты проверки частот формирования ДС в спектре сигнала. Как видно из табл. 4, разность частот формирования ДС и истинных значений частот ДС не превышает 1,15 Гц, что для практических приложений вполне допустимо. Следовательно, проверка прошла успешно.

На рис. 3 приведен график зависимости частот ДС от времени, иллюстрирующий стабильность формирования ДС во времени.

В табл. 5 приводятся результаты проверки частот формирования ДС в спектре АО. Нетрудно видеть, что полученное значение разности не превышает 0,01 Гц, что для практических приложений вполне допустимо. Проверка прошла успешно.

Измеренная частота ДС, Гц	Моделируемая частота ДС, Гц	Разность, Гц
0,19	0,2	-0,01

Таблица 5. Результаты проверки частот формирования ДС в спектре АО

Заключение

Разработан и протестирован имитатор сигналов на выходе приемных элементов с гибкими протяженными буксируемыми антеннами, учитывающий особенности излучения, распространения и приема сигналов и помех в реальных морских условиях, влияющие на эффективность работы гидроакустических станций с гибкими протяженными буксируемыми антеннами. Предложены модели блока формирования распределенных помех и блока формирования сигналов локальных источников имитатора. Разработанный имитатор позволяет проводить отработку алгоритмов обнаружения, классификации и определения координат морских шумящих объектов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 11-08-01097-а и 12-08-00511-а).

Литература

1. Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В. Корабельная гидроакустическая техника. Состояние и актуальные проблемы. – СПб: Наука, 2004. – 143 с.
2. Справочник штурмана / Под ред. В.Д. Шандабылова. – М.: Воениздат, 1968. – 544 с.
3. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики. – Л.: Судостроение, 1978. – 445 с.
4. Кудрявцев А.А., Лугинец К.П., Машошин А.И. Об амплитудной модуляции подводного шумоизлучения гражданских судов // Акустический журнал. – 2003. – Т. 49. – № 2. – С. 224–228.
5. Акустика океана / Под ред. акад. Л.М. Бреховских. – М.: Наука, 1974. – 693 с.
6. Малышкин Г.С. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов. Т.1. Оптимальные методы. Т. 2. Адаптивные методы. – СПб: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009; 2011. – 400 с.; 374 с.
7. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб: Питер, 2002. – 607 с.

Шафранюк Юлия Валентиновна – ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», аспирант, Julis85@yandex.ru

УДК 519.816+338.24

СРЕДСТВА ВЕКТОРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ
КЛАСТЕРОВ В СРЕДЕ *MATHCAD* НА ОСНОВЕ МЕТОДА *STEM*

К.А. Булыгин, В.Ю. Пинкевич, В.А. Богатырев

Предложены средства решения задач векторной оптимизации в системе компьютерной математики Mathcad на основе метода STEM. Рассмотрено применение предлагаемых средств для оптимизации структуры кластера.

Ключевые слова: векторная оптимизация, STEM, принятие решений, кластер, компьютерная математика, Mathcad.

Введение

Проектирование компьютерных систем кластерной архитектуры связано с обеспечением их высокой надежности и производительности при низких затратах на построение и эксплуатацию системы, что обуславливает необходимость решения задач векторной оптимизации [1].

Эффективность векторной оптимизации во многом зависит как от выбора метода поиска решений, так и от используемых для этого инструментальных средств. В качестве инструментальных средств оптимизации может использоваться система компьютерной математики Mathcad, включающая встроенные функции оптимизации *Minimize* ($f, x_1, x_2, \dots$) / *Maximize* ($f, x_1, x_2, \dots$) [2]. Сведение векторной задачи оптимизации к скалярной на основе метода отклонения от идеала, мультипликативного или аддитивного критерия [1], программная реализация которых в среде Mathcad предложена в [3], сопряжена с субъективностью задания весов (важности) частных критериев. Формально определить веса частных критериев позволяет известный метод STEM, предполагающий выполнение многоэтапной процедуры [1]. В настоящей работе решается задача расширения возможностей системы Mathcad в результате программирования набора средств (функций) поддержки векторной оптимизации на основе метода STEM.

Постановка задачи оптимизации кластера

В качестве объекта оптимизации рассмотрим многоуровневую компьютерную систему кластерной архитектуры с резервированием узлов на каждом уровне (рисунок) [4, 5].

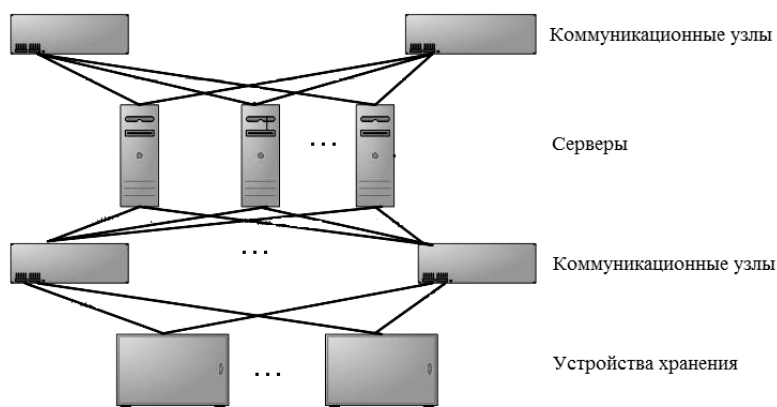


Рисунок. Структура кластерной системы

Требуется найти кратность резервирования (число узлов на каждом уровне) $m_1, m_2, \dots, m_M$, при которой обеспечивается максимум надежности системы, минимум среднего времени пребывания в ней заявок, максимум интенсивности входного потока заявок, который система выдерживает в стационарном режиме, и минимум стоимости. Кроме того, стоимость реализации системы не должна превышать C_0 . Таким образом, $U(m_1, m_2, \dots, m_M) \rightarrow \min$, $\Lambda(m_1, m_2, \dots, m_M) \rightarrow \max$ и $C(m_1, m_2, \dots, m_M) \rightarrow \min$ при

$C(m_1, m_2, \dots, m_M) = \sum_{i=1}^M m_i c_i \leq C_0$. Возможна постановка задачи минимизации стоимости при ограничении

остальных показателей. Задачи векторной оптимизации кластеров в различных постановках решались в [5–9]. При оптимизации будем считать заданными: интенсивность входного потока заявок λ ; вероятности безотказной работы узлов $p_1, p_2, p_3, \dots, p_M$; средние времена обработки заявок узлами $v_1, v_2, v_3, \dots, v_M$; стоимости узлов соответствующих уровней $c_1, c_2, c_3, \dots, c_M$.

Оценка частных показателей качества

Надежность системы оценим по вероятности сохранения работоспособности, которая зависит от формулировки условия отказа (сохранения функционирования Y). Если система работоспособна, когда на i -м уровне системы исправно не менее чем d_i узлов, то надежность системы [6, 7] составляет

$$P(m_1, m_2, m_3, \dots, m_M) = \sum_{k_1=d_1}^{m_1} \sum_{k_2=d_2}^{m_2} \sum_{k_3=d_3}^{m_3} \dots \sum_{k_M=d_M}^{m_M} C_{m_1}^{k_1} C_{m_2}^{k_2} C_{m_3}^{k_3} \dots C_{m_M}^{k_M} \times \\ \times p_1^{k_1} p_2^{k_2} p_3^{k_3} \dots p_M^{k_M} (1-p_1)^{m_1-k_1} (1-p_2)^{m_2-k_2} (1-p_3)^{m_3-k_3} \dots (1-p_M)^{m_M-k_M}$$

где $m_1, m_2, m_3, \dots, m_M$ – число узлов на каждом уровне, $C_m^k = m!/(k!(m-k)!)$ – число сочетаний из m по k .

Если условие работоспособности заключается в исправности на каждом уровне хотя бы одного узла [8, 9], то $P(m_1, m_2, m_3, \dots, m_M) = \prod_{i=1}^M (1 - (1-p_i)^{m_i})$.

Представим каждый узел системой массового обслуживания типа $M/M/1$. Считая, что каждая заявка последовательно обслуживается одним из исправных узлов на каждом уровне системы, среднее время пребывания заявок в системе равна

$$U(m_1, m_2, m_3, \dots, m_M) = \sum_{i=1}^M v_i / (1 - v_i \lambda / m_i).$$

Максимальная интенсивность входного потока заявок

$$\Lambda(m_1, m_2, m_3, \dots, m_M) = \min_i (m_i / v_i).$$

Функцию для вычисления надежности в Mathcad зададим как

$$P(N) := \begin{cases} r \leftarrow 1 \\ \text{for } j \in 0..last(p) \\ r \leftarrow r \sum_{i=elem_min_j}^{N_j} combin(N_j, i) (p_j)^i (1-p_j)^{N_j-i} \\ r \end{cases}$$

Анализ приведенных целевых функций показывает необходимость обеспечения целочисленного поиска экстремумов и возможности поиска решений при нахождении искомых параметров оптимизации над знаком суммы в целевой функции, что не поддерживается встроенными средствами системы Mathcad.

Метод STEM

Метод STEM предусматривает выполнение многоэтапной процедуры [1]. Сначала проводится оптимизация по каждому критерию в отдельности, в результате формируется матрица значений критериев для найденных вариантов. Затем эта матрица нормализуется, и по ней находятся технические веса критериев. После этого проводится оптимизация по аддитивному критерию с использованием найденных весов. Результат предъявляется лицу, принимающему решение (ЛПР), которое может принять найденный вариант или изменить условия (ограничения) по частному критерию, не удовлетворяющему требованиям к системе, и этапы поиска решения повторяются.

Описание реализованных средств оптимизации

Система функций реализации метода STEM включает несколько вспомогательных и основных функций. Далее описаны только самые важные из них. Исходными данными для представленных функций является множество вариантов, заданное в виде матрицы, строки которой являются векторами критериев.

Вспомогательные функции нужны для выполнения некоторых операций с векторами. Функция $is_member(z, V)$ служит для проверки, является ли значение z элементом вектора V . Функция $fill_vector(value, length)$ возвращает вектор длины $length$, заполненный значением $value$. Функции $i_max(V)$ и $i_min(V)$ возвращают индексы максимального и минимального элемента в векторе.

Функция нормализации нормализует значения всех критериев в заданной матрице по столбцам и приводит их к виду «чем больше, тем лучше». Эта и другие функции принимают в качестве параметра вектор (L_b) («less better») с номерами критериев вида «чем меньше, тем лучше».

Функции для нахождения множества вариантов, удовлетворяющих заданным ограничениям. Функция $is_satisfied(Crits, Lim, L_b)$ проверяет значения критериев одного варианта на соответствие ограничениям, а функция $stem_R(R, Lim, L_b)$ возвращает матрицу из тех векторов критериев, которые удовлетворяют наложенным ограничениям:

```

stem_R(R, Lim, L_b) := | j ← 0
                       | for i ∈ 0..rows(R) - 1
                       |   if is_satisfied[(RT)(i), Lim, L_b]
                       |     newR(j) ← (RT)(i)
                       |     j ← j + 1
                       | newRT

```

Функция скалярной оптимизации,

```

stem_T(R, Lim, L_b) := | SR ← stem_R(R, Lim, L_b)
                       | Cols ← SRT
                       | for n ∈ 0..cols(SR) - 1
                       |   T(n) ← | Cols(i_max(SR(n))) if ¬is_member(n, L_b)
                       |         | Cols(i_max(SR(n))) otherwise
                       |   TT,

```

находит варианты, лучшие по каждому из частных критериев (располагаемые по диагонали полученной матрицы).

Функции для нахождения технических весов критериев. По нормализованной матрице, формируемой функцией $stem_T(R, Lim, L_b)$ вычисляются средние значения элементов по столбцам (кроме диагонально расположенных элементов матрицы):

$$\alpha_j = \left[\left(\sum_{i=1}^m C_i^j \right) - C_j^j \right] / (m-1),$$

где m – количество критериев (количество строк в таблице).

Затем из соотношений $\frac{\lambda_i}{\lambda_j} = \frac{1-\alpha_i}{1-\alpha_j}$ и $\sum_{i=1}^m \lambda_i = 1$ находятся веса: $\lambda_i = (1-\alpha_i) / \left(m - \sum_{j=1}^m \alpha_j \right)$.

Функции имеют вид

```

stem_αs(R, Lim, L_b) := | T ← normalize(stem_T(R, Lim, L_b), L_b)
                       |   TT · fill_vector(1, cols(T)) - 1
                       |   cols(T) - 1
stem_λs(R, Lim, L_b) := | αs ← stem_αs(R, Lim, L_b)
                       |   1 - αs
                       |   length(αs) - ∑ αs

```

Функция оптимизации по глобальному критерию проводит оптимизацию по аддитивному критерию $C_{gl} = \sum_{i=1}^m c_i \cdot \lambda_i$ с использованием формально найденных весов и возвращает вектор значений критериев оптимальной системы.

```

stem(R, Lim, L_b) := | SR ← stem(R, Lim, L_b)
                    | Cols ← normalize(SR, L_b)T
                    | λs ← stem_λs(R, Lim, L_b)
                    | max_value ← -∞
                    | for i ∈ 0..cols(Cols) - 1
                    |   value ← λs · Cols(i)
                    |   if value > max_value
                    |     max_value ← value
                    |     max_ind ← i
                    | (SRT)(max_ind)

```


Пример поиска решений

Рассмотрим применение предложенных функций при оптимизации кластера.

Зададим ограничения для критериев и вектор, указывающий, значения каких критериев при оптимизации надо максимизировать, а каких – минимизировать: $P0:=0,9$, $U0:=10$ с, $\Lambda0:=0$, $C0:=100$ у.е., вектор ограничений $L:=stack(P0,U0,\Lambda0,C0)$, вектор $L_b:=stack(1,3)$, это означает, что минимизируем U и C . Время пребывания будет рассчитываться при $\lambda:=0,2$ с.

Сформируем матрицу RN , содержащую значения критериев и имена систем, которые представляют собой перечисление числа узлов на каждом уровне в виде «a-b-c». Затем отделим критерии от имен и найдем область Парето, чтобы сузить поиск.

Pareto names filter

$RN:=make_RN(L,L_b)$

$R:=RN_to_R(RN)$

$N:=RN_to_N(RN)$

$R_n:=normalize(R,L_b)$

$N_p:=pareto_names(R_n,N)$

$R_p:=filter_names(R,N,N_p)$

R_p – матрица критериев для решений из области Парето. По этой матрице и будем проводить оптимизацию методом STEM.

Решение получаем, применяя функцию $stem(R_p,L,L_b)$, при этом искомый вектор критериев оптимальной системы с учетом заданных ограничений имеет вид

$$\begin{pmatrix} 0,999468 \\ 9,065934 \\ 1,5 \\ 51 \end{pmatrix}.$$

Предложенные средства позволяют отслеживать промежуточные шаги процесса поиска решения.

Первый шаг – оптимизация по частным критериям: $T:=stem_T(R_p,L,L_b)$.

Для заданных исходных данных результат получаем в виде матрицы

$$T = \begin{pmatrix} P & T & \Lambda & C \\ 1 & 8,554331 & 2,25 & 100 \\ 0,999997 & 8,500444 & 2,5 & 100 \\ 0,999999 & 8,571429 & 3 & 99 \\ 0,983566 & 10 & 1 & 33 \end{pmatrix}.$$

Второй шаг – нахождение технических весов, используя функцию $stem_ls(R_p,L,L_b)$, в результате применения которой для рассматриваемого примера получаем вектор

$$\begin{pmatrix} 0,149437 \\ 0,161837 \\ 0,242768 \\ 0,445958 \end{pmatrix}.$$

Третий шаг – оптимизация по глобальному критерию. Вспомогательная функция позволяет получить имя и параметры выбранной системы:

$characteristics:=stem(R_p,L,L_b)$

$name:=crits_to_name(characteristics,R_p,N_p)$

$name="3-6-3"$

В результате применения этой функции для рассматриваемого примера получаем вектор

$$characteristics = \begin{pmatrix} 0,999468 \\ 9,065934 \\ 1,5 \\ 51 \end{pmatrix}.$$

Четвертый шаг – уточнение условий. Результат предьявляется ЛППР, которое может указать, по какому частному критерию его не устраивает решение, после чего на соответствующий критерий установ-

ливается ограничение. Допустим, ЛПР не удовлетворено средним временем пребывания заявок и требует, чтобы оно было меньше 9 с. Из результатов оптимизации по частным критериям видно, что есть возможность снижать это время почти до 8,5 с. Изменяя ограничение для времени пребывания $U0:=9$ с, получим:

$$name = "4-8-4",$$

$$characteristics = \begin{pmatrix} 0,999959 \\ 8,77193 \\ 2 \\ 68 \end{pmatrix}.$$

Заключение

Показано, что решение задачи векторной оптимизации многоуровневых компьютерных систем кластерной архитектуры требует расширения возможностей системы Mathcad средствами целочисленного поиска экстремумов и поиска решений для целевой функции, содержащей искомые параметры оптимизации над знаком суммы.

Предложено расширение возможностей системы компьютерной математики Mathcad при создании набора средств (функций) поддержки поиска решений задач векторной оптимизации на основе метода STEM.

Литература

1. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных странах: Учебник. – М.: Логос, 2002. – 392 с.
2. Воскобойников Ю.Е., Очков В.Ф. Программирование и решение задач в пакете Mathcad. – Новосибирск: НГАСУ, 2002. – 69 с.
3. Богатырев В.А., Булыгин К.А., Пинкевич В.Ю. Векторная оптимизация с программированием в среде Mathcad при комплексировании машин и агрегатов // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2011. – № 4. – С. 48–54.
4. Богатырев В.А., Богатырев С.В. Критерии оптимальности многоустойчивых отказоустойчивых компьютерных систем // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 5 (63). – С. 92–98.
5. Богатырев В.А. Оценка надежности и оптимальное резервирование кластерных компьютерных систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2006. – № 10. – С. 18–21.
6. Богатырев В.А. Оптимальное резервирование системы разнородных серверов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. – № 12. – С. 30–36.
7. Богатырев В.А., Богатырев С.В. К анализу и оптимизации серверных систем кластерной архитектуры с балансировкой нагрузки // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 2. – С. 4–9.
8. Богатырев В.А., Богатырев С.В., Богатырев А.В. Оптимизация кластера с ограниченной доступностью кластерных групп // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 1 (71). – С. 63–66.
9. Богатырев В.А., Богатырев С.В. Объединение резервированных серверов в кластеры высоконадежной компьютерной системы // Информационные технологии. – 2009. – № 6. – С. 41–47.

- | | |
|---------------------------------------|---|
| Булыгин Кирилл Александрович | – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, kirill.bulygin@gmail.com |
| Пинкевич Василий Юрьевич | – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, vasilii.pinkevich@yandex.ru |
| Богатырев Владимир Анатольевич | – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, vladimir.bogatyrev@gmail.com |

УДК 517.521:004.046

ДЕКОМПОЗИЦИЯ n -МЕРНЫХ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ ПО БАЗИСУ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ВСПЛЕСКОВ

А.Ю. Гришенцев, А.Г. Коробейников

В работе рассмотрен способ декомпозиции n -мерных цифровых сигналов, полученный на базе вейвлет-преобразования, при этом n -мерные цифровые сигналы рассматриваются как суперпозиция вейвлетов. Практическое применение способа возможно для преобразования и обработки статических и динамических изображений, стеганографии, спектрального анализа многомерных дискретных полевых структур, решения задач математической физики.

Ключевые слова: декомпозиция n -мерных сигналов, спектральный анализ, цифровая обработка сигналов.

Введение

Задача получения спектра n -мерных неразделимых цифровых сигналов очень часто возникает в современных системах обработки, преобразования и передачи информации. Под неразделимым сигналом в настоящей работе понимается такой сигнал, который нельзя задать в виде прямого произведения одномерных функций. Для разделимого сигнала частотная или временная (пространственная) характеристика факторизуема в произведение одномерных характеристик, в то время как для неразделимого сигнала такое разложение невозможно [1].

В настоящее время разработаны методы получения спектра одномерных и многомерных сигналов путем вейвлет-преобразования (ВП) [2]. Для получения спектра неразделимых сигналов при ВП размерность материнского вейвлета должна совпадать с размерностью разделяемого сигнала. ВП предоставляет свободу в выборе материнского вейвлета, позволяя выбрать оптимальную базисную функцию для разложения анализируемого сигнала. С другой стороны, недостатком является трудоемкость формирования библиотек вейвлетов и принципиальная невозможность выбора универсального базиса даже для сходных цифровых сигналов, например, изображений. Отдельно отметим, что декомпозиция цифровых сигналов находит широкое применение в современной практике решения обратных задач математической физики [3, 4].

Формальное описание способа

Основной задачей предлагаемого способа является получение спектра n -мерного неразделимого цифрового сигнала и его локализация в пространстве и (или) времени [5]. Эта задача решается путем последовательных итеративных вычислений в ходе прямого одномерного ВП (декомпозиции) в соответствии с выражением

$$f_{k-1} = f_k - S_k, \quad (1)$$

где k – номер спектральной компоненты по масштабному признаку. Значение индекса k соответствует длине (периоду) взаимно перпендикулярных и параллельных элементов спектральных компонент; f_k – остаточный сигнал (исходный сигнал f_k , где $k = K$ – максимальное (исходное) значение индекса k); S_k – элементы исходного сигнала, отобранные по масштабному признаку. Сумма всех полученных в ходе прямого преобразования спектральных компонент S_k является обратным преобразованием (синтезом), и равна:

$$f_K = \sum_{k=1}^K S_k.$$

Таким образом, разложение n -мерного сигнала на спектральные компоненты происходит не по выбранному заранее n -мерному базису (базисной функции), а по взаимно параллельным и перпендикулярным элементам исходного сигнала, которые образуют уникальный для данного сигнала n -мерный базис. В работе используются следующие обозначения: для функции одномерного сигнала – $f[x_1]$, для двумерного – $f[x_1, x_2]$, для n -мерного – $f[x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$. Координаты вектора поля в указанной точке: для одномерного – $\{v_1\}$, для двухмерного – $\{v_1, v_2\}$, для p -мерного – $\{v_1, v_2, v_3, \dots, v_p\}$.

В практике обработки цифровых сигналов координаты положения и направлений вектора поля часто имеют различную размерность. Например, если в качестве сигнала рассматривать сигнал, отображаемый на дисплее осциллографа, то координата времени будет соответствовать координате положения ($f(t)$ – одномерное), координате вектора поля будет соответствовать амплитуда ($\{v_1\}$ – одномерное). В данном случае координаты положения и координаты вектора поля имеют одинаковую размерность, но различные единицы измерения. Рассмотрим примеры, когда размерности положения и вектора поля различны.

Положение каждого пикселя цифрового изображения, сформированного на двумерной плоскости, характеризуется двумя координатами $f[x_1, x_2]$. В случае представления изображения в виде оттенков

серого цвета мы будем иметь одномерное пространство для вектора поля $\{v_1\}$. В цветном изображении можно разделить спектр по базису цветового пространства, например, трехкомпонентному RGB-пространству цветов, получив трехмерное пространство для вектора поля $\{R, G, B\}$.

Каждая компонента (элемент) сигнала является тензором, который можно рассматривать в пространстве, отличном от пространства, в котором существует породившее его поле. Таким образом, цифровые сигналы образуют тензорные поля. В настоящей работе, с определенными допущениями, ограничимся рассмотрением n -мерных сигналов как векторных полей.

Дискретную структуру, имеющую размерность, равную размерности исходного сигнала с отличной от нуля амплитудой (высотой), будем называть элементарным всплеском. В направлении выделения элементарного всплеска, его протяженность может иметь любое отличное от нуля значение, но не более размера исходного сигнала в данном направлении. По другим направлениям размеры элементарного всплеска равны единице дискретизации соответствующих направлений.

Разделение исходного сигнала f_k на спектральные компоненты происходит последовательно по всем направлениям размерности сигнала, начиная с самых протяженных (долгопериодических) элементарных всплесков. В каждой последующей итерации в соответствии с (1) протяженность элементарного всплеска имеет значение на единицу меньше, чем в предыдущей. При выделении из исходного сигнала взаимно перпендикулярных всплесков учитывается принцип суперпозиции волн, т.е. сложения их амплитуд в месте пересечения. По этой причине последовательность обхода направлений для выполнения условия однозначности разложения должна быть одинаковой для каждой спектральной компоненты S_k , являющейся суммой элементарных всплесков протяженностью k , выделенных в остаточном сигнале f_k по всем направлениям.

Алгоритм реализации

Алгоритм реализации предлагаемого способа определяется форматом исходного n -мерного сигнала и для формирования спектральных компонент в N -мерном пространстве $x_1, x_2, \dots, x_N$ при одномерном векторе поля представлен на рис. 1.

Результатом вычислений по алгоритму является совокупность спектральных составляющих, образованных суммами перпендикулярных и параллельных элементарных всплесков в направлениях $x_1, x_2, \dots, x_N$. Таким образом, разложение исходного сигнала осуществляется по функциям «суммы элементарных всплесков», содержащихся в самом исходном сигнале.

Полученные спектральные компоненты имеют размерность исходного сигнала $p[x_1, x_2, \dots, x_N]$ и одномерного вектора поля $\{v_1\}$, т.е. являются скалярным полем. При разложении в спектр предлагаемым способом для многомерных полевых структур с размерностью поля $\{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$ расчет спектральных составляющих необходимо производить отдельно для каждого направления $v_1, v_2, v_3, \dots, v_p$. Полученные наборы спектральных компонент можно рассматривать как векторные составляющие спектра поля и объединять их путем сложения векторных компонент, перенося в пространство, имеющее соответствующую размерность.

Однозначность разложения определяется соблюдением условий последовательности действий. В случае пересечения при сложении взаимно перпендикулярных всплесков, в силу суперпозиции, значение в области пересечения является суммой пересекающихся всплесков. В связи с этим при последовательном вычитании перпендикулярных всплесков без соблюдения выбранной заранее по координатной последовательности может возникнуть неоднозначность разложения. Таким образом, необходимо строго выполнять по координатной последовательности вычитания перпендикулярных всплесков, т.е. придерживаться заранее выбранной последовательности.

Иллюстрация способа

Рассмотрим спектр двумерного сигнала с одномерным вектором поля (рис. 2). Вектор поля направлен вверх от плоскости, образуемой осями x_1, x_2 . В соответствии с выражением (1) исходный сигнал есть f_{10} , а остаточные составляющие сигнала – f_4, f_1, f_0 , причем f_0 – нулевой остаток. Выделение спектральных компонент S_5, S_2, S_1 осуществляется по протяженности всплесков, причем сначала выделяются всплески в направлении x_1 , затем – в направлении x_2 . Следует обратить внимание, что максимальная протяженность всплеска соответствует максимальному размеру (числу элементов дискретизации) разделяемой на спектр области из направлений положения. Для рассматриваемого случая максимальный размер соответствует оси x_1 с числом дискретов 10; по оси x_2 максимальная длина всплесков ограничена размером 5.

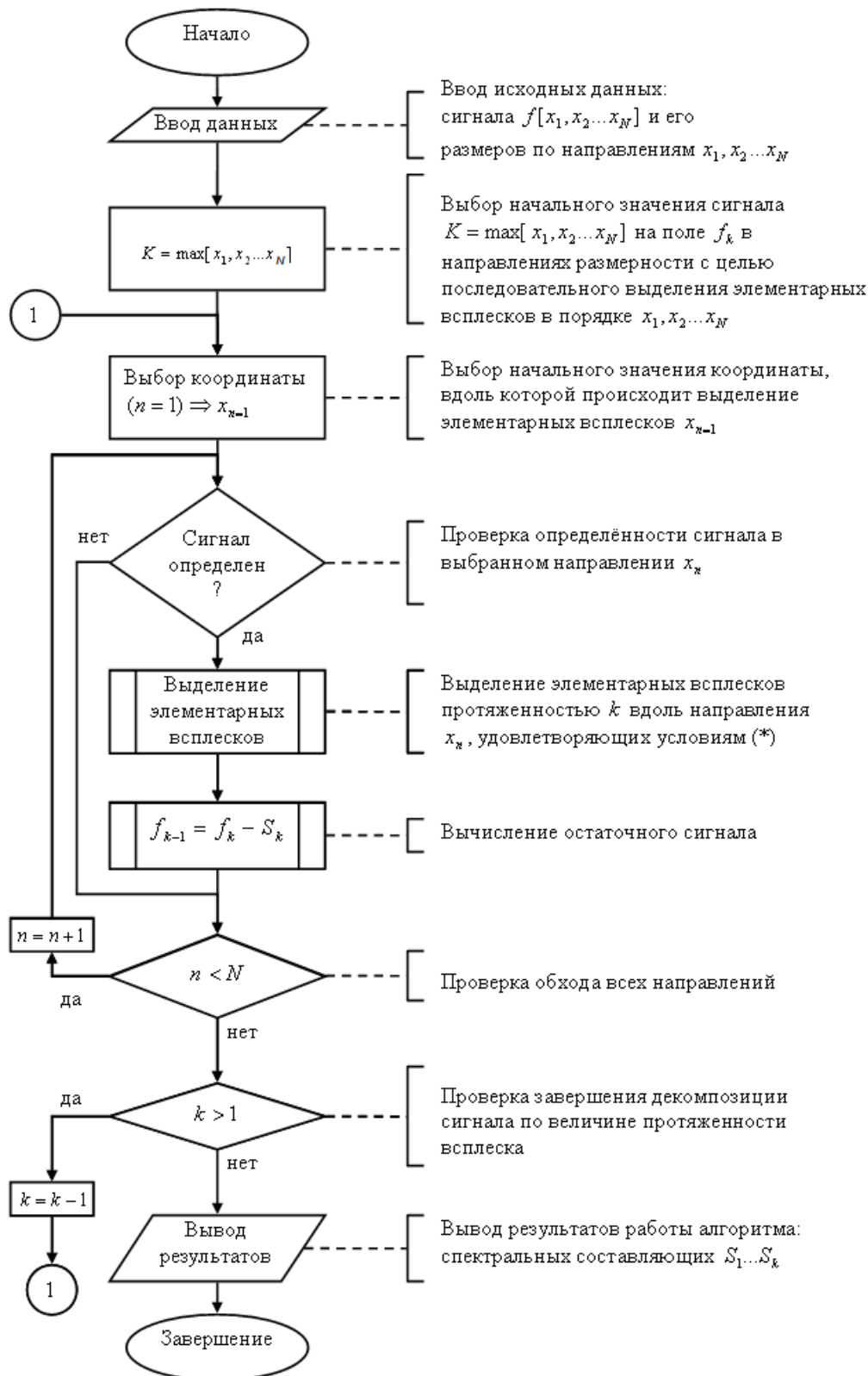


Рис. 1. Блок-схема алгоритма декомпозиции N-мерного сигнала по базису ортогональных всплесков.

(*) Условия выделения элементарных всплесков:

- границами всплеска считаются элементы, имеющие либо нулевое, либо отличное по знаку (в случае знакопеременного сигнала) значение от значений всплеска;
- элементарный всплеск имеет амплитуду, которая определяется как минимальное значение амплитуды на всем протяжении между его границами;
- у элементарного всплеска единичная протяженность по всем направлениям положения, кроме x_n

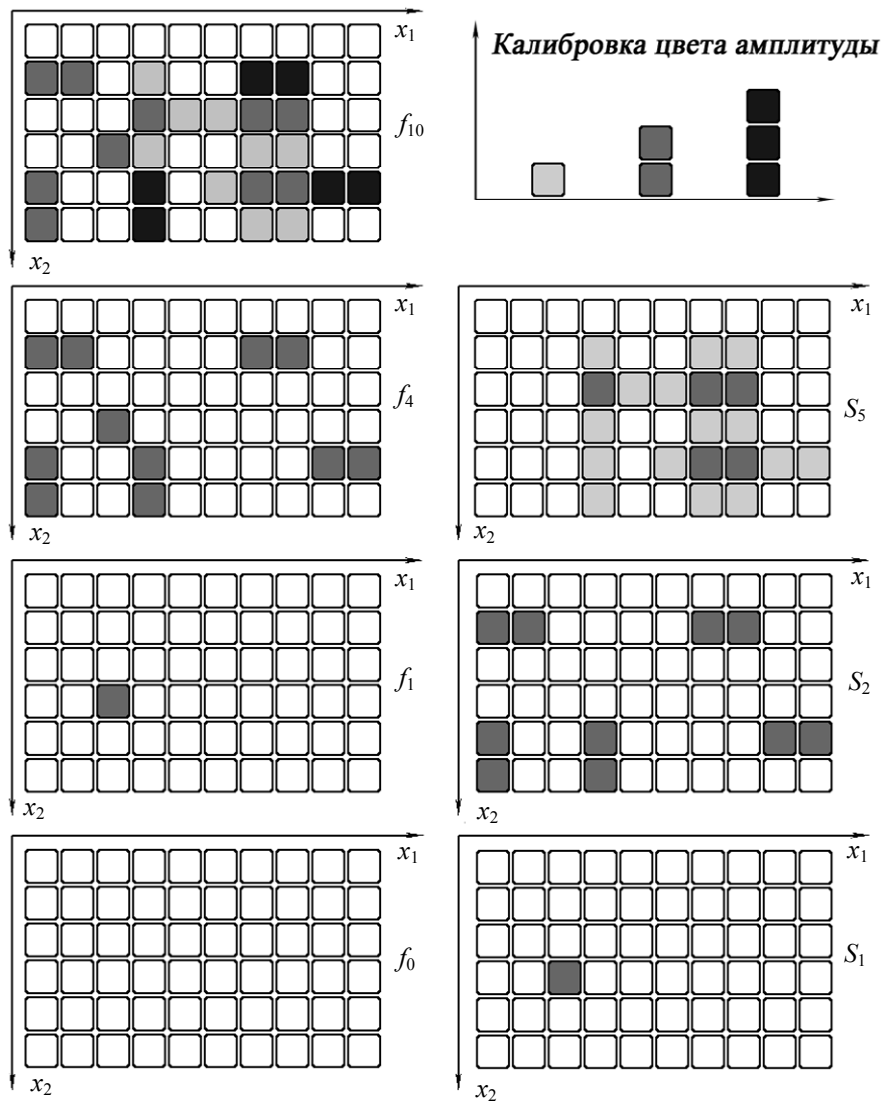


Рис. 2. Декомпозиция двумерного сигнала по базису ортогональных всплесков

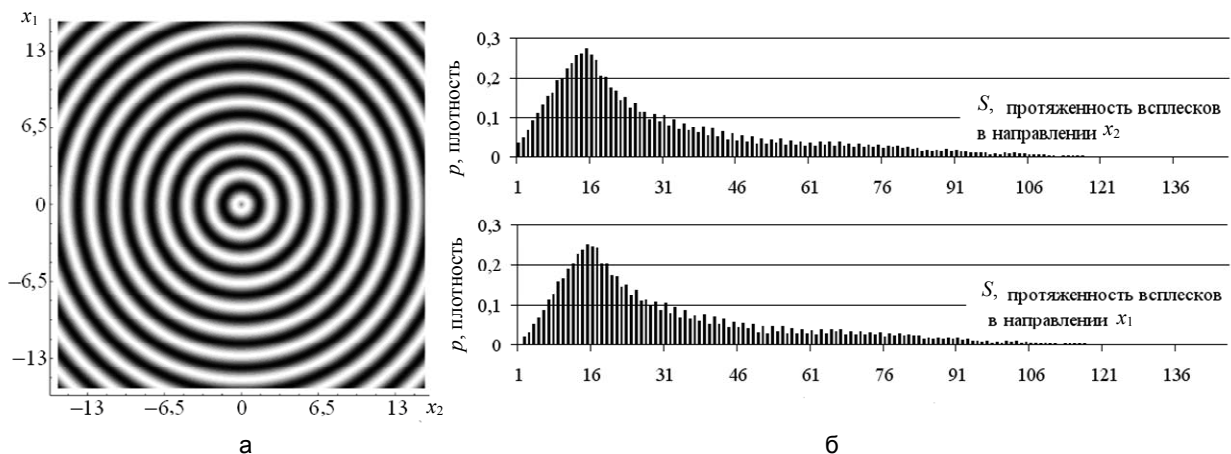


Рис. 3. Двумерный сигнал (а) и распределение плотности ненулевых элементов в спектральных компонентах (б)

Рассмотрим пример разложения по базису ортогональных всплесков двумерного поля (рис. 3, а), заданного функцией $f[x_1, x_2] = \sin(\sqrt{x_1^2 + x_2^2})$, где $x_1, x_2 \in [-15\pi, 15\pi]$.

На графиках (рис. 3, б) показано распределение плотности p ненулевых элементов в спектральных составляющих (в элементах декомпозиции) в зависимости от протяженности всплеска вдоль оси x_1 . Плотность ненулевых элементов в спектральных компонентах рассчитывалась как число ненулевых элементов в поле спектральных компонент, отнесенное к полному числу (площади) всех спектральных компонент. Очевидно значительное повышение плотности, соответствующее выделению всплесками радиальных волн определенной частоты.

Заключение

В случае многомерного сигнала предлагаемый способ отличается от вейвлет-преобразования отсутствием заранее выбранной многомерной функции разложения. Базис выбирается из элементов исходного сигнала путем вычислений для каждой спектральной компоненты, совокупность которых образует спектр. Каждую спектральную компоненту n -мерного сигнала можно считать суперпозицией одномерного вейвлет-преобразования векторов, образующих исходный сигнал по каждому из n -измерений, на базе функции типа меандр, с определенным масштабным коэффициентом по протяженности. Амплитуда элементов, соответствующих спектральной компоненте, может принимать дискретные положительные или отрицательные значения.

Предлагаемый способ позволяет получить отображение сигнала в фазовое пространство и, следовательно, получить четкую привязку спектральных особенностей сигнала к пространству и (или) времени. Стоит заметить, что отобразить одномерный сигнал на фазовую плоскость позволяет оконное преобразование Фурье.

Предложенный способ декомпозиции n -мерных сигналов может быть выполнен в целочисленной арифметике (без потери точности), что позволяет считать его достаточно быстрым и сравнительно легко реализуемым с помощью аппаратных средств.

Литература

1. Чобану М. Многомерные многоскоростные системы обработки сигналов. – М.: Техносфера, 2009. – 480 с.
2. Шарк Г.Г. Применение вейвлетов для ЦОС. – М.: Техносфера, 2007. – 192 с.
3. Гришенцев А.Ю., Коробейников А.Г. Разработка модели решения обратной задачи вертикального зондирования ионосферы // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 2 (72). – С. 109–113.
4. Сизиков В.С., Кривых А.В. Применение способа эталонных примеров при решении обратной задачи спектроскопии методом регуляризации // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54. – № 9. – С. 44–51.
5. Заявка на изобретение. Способ построения спектра n -мерных неразделимых цифровых сигналов. Гришенцев А.Ю., Коробейников А.Г. №2011126856, от 29.06.2011.

Гришенцев Алексей Юрьевич

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, tigerpost@ya.ru

Коробейников Анатолий Григорьевич

– Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, доктор технических наук, профессор, зам. директора, Korobeynikov_A_G@mail.ru

УДК 004.274

ОРГАНИЗАЦИЯ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

А.С. Румянцев

Приводятся основные понятия, концепции и особенности реконфигурируемых вычислительных систем. Определены критерии классификации данных систем, выполнено деление наиболее известных из них по предложенным критериям. Представлены существующие подходы к оценке эффективности реконфигурируемых вычислительных систем. Рассмотрено состояние инструментальных средств проектирования для данных систем.

Ключевые слова: реконфигурируемые вычислительные системы, «зернистость» вычислений, критерии классификации вычислительных систем, оценка эффективности вычислительных систем.

Введение

Стремительный прогресс в полупроводниковой электронике вместе с появлением совершенно новых областей ее применения неизбежно приводит не только к повышению требований со стороны вычислительной техники, но и к большей степени зависимости этих требований от решаемой задачи. По-

вышение уровня интеграции микросхем позволяет поместить сотни миллионов транзисторов на одном кристалле, но это также ужесточает требования к процессу разработки и средствам проектирования, увеличивая полное время разработки и единовременные затраты на создание интегральных схем [1]. Все вышеупомянутые тенденции, вкуче с ограничением по энергопотреблению и стремлением к уменьшению времени выхода продукта на рынок, приводят к необходимости реконфигурируемости в будущих проектах интегральных схем.

Цель данной работы состоит в том, чтобы определить критерии классификации и выполнить деление наиболее известных реконфигурируемых вычислительных систем (РВС) в соответствии с этими критериями, а также представить подходы к проектированию систем на их основе. Кроме того, в работе обобщены основные понятия, концепции и особенности РВС.

Основные понятия и концепции РВС

Термин «реконфигурируемая вычислительная система» (РВС) до сих пор не имеет устоявшегося определения, однако среди множества определений РВС можно выделить следующие определения как наиболее точные:

- система, которая обладает возможностью «аппаратного программирования» (изменение способа использования аппаратных блоков посредством определенного набора управляющих линий) [2];
- система, обладающая способностью к изменению «воплощаемой» при реализации модели вычислений [3].

Основные концепции, на которых основаны РВС:

1. разработка проблемно-ориентированных аппаратных блоков с учетом уровня гранулярности вычислительного процесса и обрабатываемых данных для определенного класса задач;
2. использование параллелизма при выполнении вычислений за счет наличия нескольких обрабатывающих блоков и конвейеризации;
3. реконфигурация проблемно-ориентированных аппаратных блоков для адаптации к изменившимся параметрам решаемой задачи (класса задач), для совместного и повторного использования вычислительных ресурсов и т.д.;
4. применение, помимо реконфигурируемых проблемно-ориентированных блоков (РПОБ), процессоров общего назначения и специализированных сверхбольших интегральных схем (СБИС) в случаях, когда прямое использование РПОБ неэффективно в силу различных условий (например, ограничений реального времени и т.д.).

Реализация определенной функциональности вычислительной системы аппаратно дает лучшую энергоэффективность с точки зрения производительности на потребляемую мощность, но данный подход имеет ограниченную гибкость для удовлетворения будущих или изменчивых требований к системе. Архитектуры на основе процессоров, в особенности на основе процессоров общего назначения, обеспечивают лучшую гибкость, но имеют низкую энергоэффективность с точки зрения производительности на потребляемую мощность. РВС должны занять пустующую нишу между специализированными системами и системами общего назначения (рис. 1) [4].

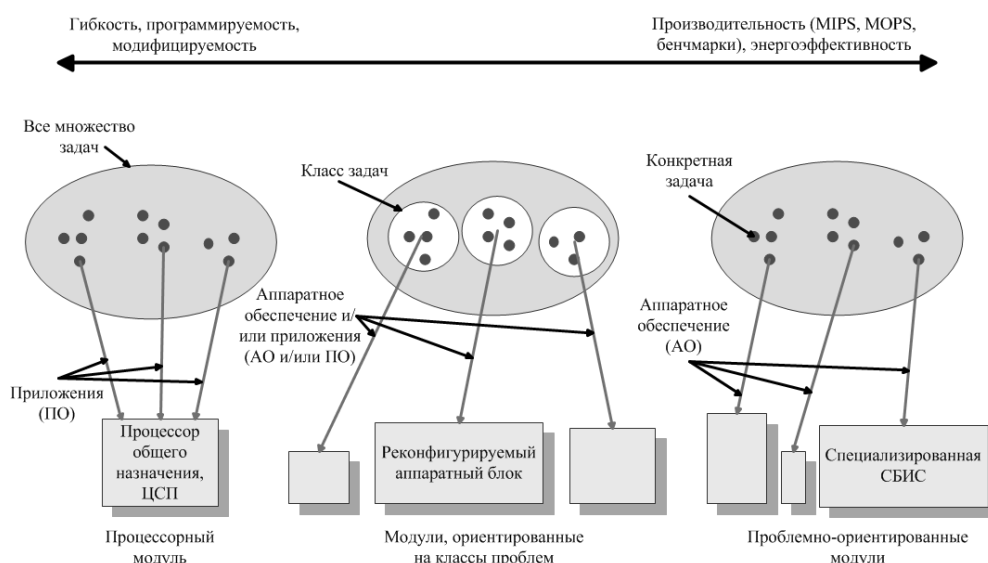


Рис. 1. Спектр задач и возможных программно-аппаратных реализаций:
ПО – программное обеспечение; ЦСП – цифровой сигнальный процессор

Критерии классификации РВС

На текущий момент не существует устоявшегося множества критериев классификации для РВС. Большинство работ, посвященных РВС и их применению, используют различные наборы критериев, подчас противоречащие друг другу. В работе предложен набор критериев классификации для РВС и выполнено распределение наиболее значимых и перспективных из них по данным критериям (табл. 1).

РВС	Критерии классификации РВС						
	1	2	3	4	5	6	7
<i>Butter</i> [5]	шинный блок	крупно-зернистая (32 бит)	+, <i>shift</i> , ×, <i>float</i>	2D-массив	динамическая частичная	ручное	мульти-медиа
<i>DP_FPGA</i>	функциональный блок	смешанная (1 и 4 бита)	<i>bit level</i> , +, <i>shift</i> , <i>regs</i>	2D-массив	динамическая полная	полуавтоматическое (<i>FPGA</i>)	ускорение типовых вычислительно интенсивных задач
<i>DreAM</i>	сопроцессор	крупнозернистая (8, 16 бит)	+, <i>shift</i> , <i>regs</i>	2D-массив	динамическая частичная	нет данных	алгоритмы беспровод. сетей
<i>Garp</i> [6]	сопроцессор	мелкозернистая (2 бит)	<i>bit level</i> , +, <i>shift</i> , <i>regs</i>	2D-сеть	динамическая полная	автоматическое (<i>SUIF based C-compile</i>)	ускорение обработки циклов
<i>MORA</i> [7]	шинный блок	крупнозернистая (8, 16 бит)	+, ×, <i>regs</i>	2D-сеть	динамическая частичная	нет данных	мульти-медиа
<i>Pipe-Rench</i>	сопроцессор	крупнозернистая (128 бит)	+, <i>shift</i> , <i>regs</i>	1D-массив	статическая полная	автоматическое (<i>PipeRench tools</i>)	распараллеливание задач
<i>RaPiD</i>	сопроцессор	крупнозернистая (16 бит)	+, ×, <i>regs</i>	1D-массив	статическая полная	автоматическое (<i>HLL-RaPiD-C</i>)	распараллеливание задач
<i>REMARK</i>	функциональный блок	крупнозернистая (16 бит)	+, <i>shift</i> , ×, <i>regs</i>	2D-сеть	статическая полная	автоматическое (<i>modif. GCC</i>)	мульти-медиа
<i>МАНГУ-CT</i> [8]	сопроцессор	мелкозернистая (1 бит)	<i>bit level</i> , ×, <i>shift</i> , <i>regs</i>	2D-сеть	динамическая полная	автоматическое (<i>HLL-COLAMO</i>)	цифровая обработка сигналов и данных

Таблица 1. Распределение наиболее известных РВС по предложенным критериям классификации

1. Роль и расположение реконфигурируемых узлов в системе: функциональный блок центрального вычислителя или контроллера, сопроцессор, вычислительный блок, подсоединенный к системной шине (шинный блок) и вычислительный блок, внешний по отношению к плате или чипу.
2. Степень гранулярности реконфигурируемых узлов РВС (степень зернистости вычислений и обрабатываемых данных): мелкозернистая (к примеру, минимальный логический блок программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС), крупнозернистая (к примеру, процессорный узел в многопроцессорной системе) и смешанная.
3. Типы аппаратных ресурсов доступные в РВС. По данному критерию РВС можно разделить на классы в зависимости от поддерживаемого множества операций – сложения, умножения, деления, сдвига на переменную величину и т.д.
4. Способ организации коммуникационной среды РВС:
 - плоская организация структуры РВС (представляет собой одноуровневую сеть соединений реконфигурируемых узлов, блоков памяти и внешних интерфейсов);
 - иерархическая организация структуры РВС (содержит несколько уровней соединения реконфигурируемых узлов и иных ресурсов).
5. Метод и степень реконфигурации вычислительных узлов в РВС.
 - Методы реконфигурации РВС бывают следующих видов:

- статическая реконфигурация (выполняется до момента использования системы по целевому назначению и остается неизменной на всем протяжении времени работы системы);
 - динамическая реконфигурация (может происходить во время работы системы, причем множество раз).
 - По степени реконфигурации вычислительных узлов РВС делятся на следующие классы:
 - обладающие возможностью только полной реконфигурации;
 - обладающие возможностью частичной реконфигурации.
6. Наличие инструментальных средств, степень автоматизации процесса проектирования и возможность интеграции в существующие цепочки проектирования.
7. Целевая область применения (решаемый класс проблем) – например, ускорение обработки циклов, распараллеливание вычислительно интенсивных задач, мультимедиа и т.д.

Подходы к оценке эффективности РВС

При проектировании вычислительной системы разработчик зачастую сталкивается с необходимостью выбора между несколькими альтернативными способами реализации одного и того же функционала на базе различных платформ. В подобных случаях для обоснованного выбора между имеющимися альтернативами используются методы многокритериальной оптимизации. Чтобы использовать методы многокритериальной оптимизации, все множество рассматриваемых альтернатив должно иметь ортогональный набор метрик, позволяющий сравнивать их между собой с учетом возлагаемых на систему задач. На текущий момент существует достаточно много метрик, используемых при сравнении вычислительных систем, решающих один класс задач: отношение достигаемой пропускной способности (средней скорости формирования результирующих данных) к занимаемой системой площади (в квадратных единицах половины минимальной ширины канала транзистора в используемой технологии) (критерий Дехона) [9], отношение потребляемой мощности к планируемой пропускной способности системы и т.д.

Однако данные метрики не способны полностью отразить все аспекты РВС (например, возможность реализации определенной задачи с использованием разных алгоритмов в зависимости от того, будут ли они реализованы программно или аппаратно). Для решения данной задачи было предложено несколько видов метрик, из которых хотелось бы отметить следующие три метрики, которые в наибольшей степени подходят для использования в качестве метрик сравнения РВС.

1. «Ускорение» – ускорение, получаемое по сравнению с использованием процессора общего назначения или цифрового сигнального процессора:

$$\text{"ускорение"} = \frac{T_{\text{выпЦПУ}}}{T_{\text{выпРВС}} + T_{\text{настройки}} + T_{\text{коммутации}}}.$$

Метрика была предложена как часть методологии оценки РВС в работе [10].

2. Реманентность (R). Метрика, позволяющая оценить динамические характеристики реконфигурируемости РВС:

$$R = \frac{N_a \times F_e}{N_c \times F_c},$$

где N_a – количество вычислительных узлов в РВС; F_e – частота тактирования РВС; N_c – количество вычислительных узлов, которые могут быть реконфигурируемы за один цикл; F_c – максимальная частота реконфигурации.

3. Вычислительная плотность (OD). Метрика, позволяющая оценить масштабируемость РВС:

$$OD = \frac{N_a}{A},$$

где N_a – количество вычислительных узлов в РВС; A – занимаемая РВС площадь. Две последние метрики для оценки РВС вводятся в работе [11].

Состояние средств разработки систем на базе РВС

Проектирование системы на базе РВС намного сложнее, чем проектирование систем на платформе с преобладанием программной или аппаратной компоненты. Системы на базе РВС подразумевают беспрецедентную степень конвергенции между программным и аппаратным обеспечением от стадии проектирования до стадии непосредственного использования системы. Вопросы совместного программно-аппаратного проектирования (Software/Hardware Codesign) приобретают в области РВС решающее значение. Большинство существующих средств разработки систем на базе РВС поддерживает одну из трех цепочек проектирования, показанных на рис. 2. Перечень применяемых подходов на каждой из стадий процесса проектирования РВС приведен в табл. 2.

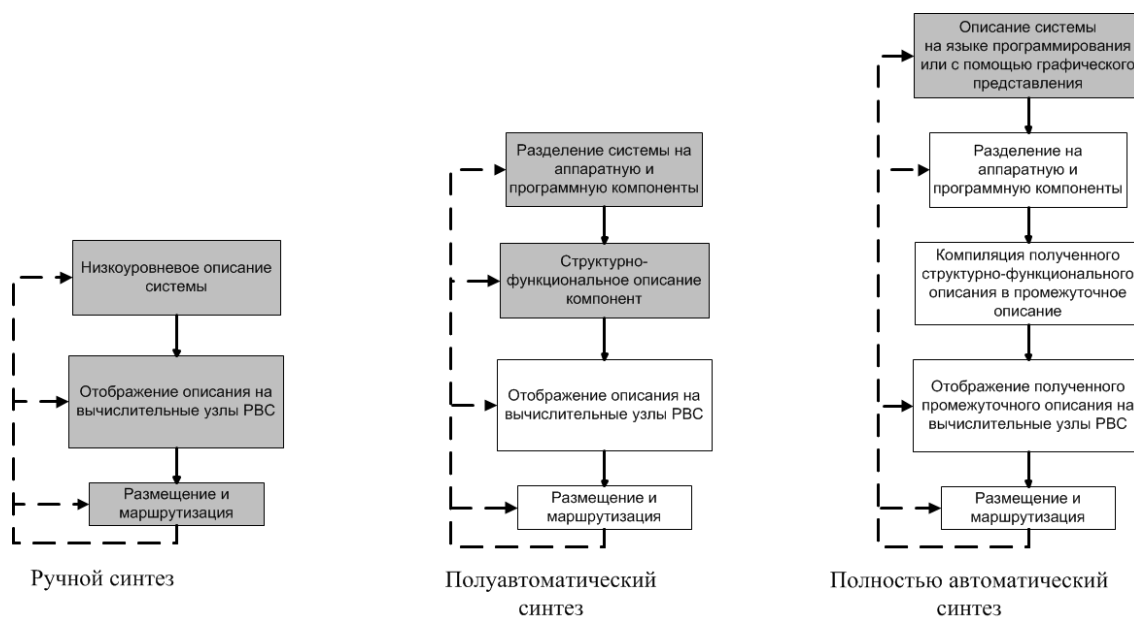


Рис. 2. Существующие цепочки проектирования систем на основе РВС [2]. Серые прямоугольники обозначают ручной, а белые – автоматический шаг(и) процесса проектирования

Стадия	Применяемые подходы
Формализация решаемой задачи	– графическое описание (SPEAR) – специализированный низкоуровневый язык – язык высокого уровня (C, Java)
Разделение на программную и аппаратную компоненты	– ручное (pragma, специальные вызовы) – автоматическое (например, в граф потока данных и управления (CDFG))
Анализ и отображение полученного описания на вычислительные узлы РВС	– прямое отображение – библиотека типовых функций и операций – интеллектуальное отображение
Непосредственное размещение полученного отображения на РВС	– алгоритм модельной «закалки» – жадные алгоритмы – дерево соответствия
Организация маршрутизации между вычислительными узлами РВС	– статическая маршрутизация – варианты алгоритма поиска пути – жадные алгоритмы маршрутизации

Таблица 2. Подходы к проектированию систем на базе РВС на разных стадиях

Заключение

Область реконфигурируемых систем является многообещающей и сравнительно молодой исследовательской сферой, поэтому огромное множество особенностей реконфигурируемых систем, их процесс проектирования и инструментальные средства являются открытой темой для исследований и экспериментов.

Предложенные в работе критерии классификации РВС могут быть полезными при выборе архитектуры РВС в зависимости от проектных ограничений и целевой области использования системы. Представленные подходы к оценке эффективности РВС помогут выбрать подходящий вариант РВС исходя из имеющихся альтернатив.

Литература

1. International Technology Roadmap for Semiconductors [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://public.itrs.net>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 07.04.2011).
2. Compton K., Hauck S. Reconfigurable computing: A survey of systems and software // ACM Computer Survey. – 2002. – V. 34. – № 2. – P. 171–210.
3. Платунов А.Е. Теоретические и методологические основы высокоуровневого проектирования встраиваемых вычислительных систем. Докторская диссертация. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010 [Электронный

- ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dslib.net/avtomat-proektirovanie/platunov.html>, платный. Яз. рус. (дата обращения 20.03.2011).
4. Rabaey J.M. Reconfigurable Computing: The Solution to Low Power Programmable DSP // IEEE ICASSP Conference. – 1997. – V. 1. – P. 275–278.
 5. Garzia F. CREMA: A coarse-grain reconfigurable array with mapping adaptiveness // IEEE Field Programmable Logic and Applications Conference. – 2009. – V. 1. – P. 708–712.
 6. Callahan T.J., Hauser J.R., Wawrzynek J. The Garp architecture and C compiler // IEEE Computer Society. – 2000. – V. 33. – № 4. – P. 62–69.
 7. Chalamalasetti S.R., Purohit S. et al. MORA – An Architecture and Programming Model for a Resource Efficient Coarse Grained Reconfigurable Processor // IEEE Adaptive Hardware and Systems Conference. – 2009. – P. 389–396.
 8. Дордопуло А.И., Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А. Семейство многопроцессорных вычислительных систем с динамически перестраиваемой архитектурой // Сб. материалов Международной научно-технической конференции «Многопроцессорные вычислительные и управляющие системы». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. – Т. 1. – С. 11–17.
 9. DeHon A. Comparing computing machines // Proceedings of SPIE 3526. – 1998. – P. 124–133.
 10. Bouallegue A., Abdallah F. System Level Methodology Evaluation of Reconfigurable Computing Architectures // 2nd ICTTA Conference. – 2006. – P. 2567–2572.
 11. Benoit P. Metrics for reconfigurable architectures characterization: remanence and scalability // PDP Symposium. – 2003. – P. 8–16.

Румянцев Александр Сергеевич

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, dark-streamray@gmail.com

УДК 531.01+681.5.03+531.07

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ МНОГОЧЛЕННЫХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ АППРОКСИМАЦИЙ ЧЕБЫШЕВА

В.Г. Мельников

Рассматривается процесс преобразований уравнений автономных механических систем многочленной структуры со многими степенями свободы, связанный с методом нормализации Пуанкаре–Дюлака. Вносится изменение в метод, состоящее в аппроксимации остаточных членов высоких степеней многочленами меньших степеней с сохранением их в уравнениях, обеспечивающее существенное повышение точности преобразованной системы. При этом используется свойство мономов высоких степеней содержать переменные в высоких степенях, допускающих применение метода экономизации Чебышева.

Ключевые слова: автономная система динамических уравнений, многочленное преобразование фазовых координат, нормальные формы Пуанкаре–Дюлака, экономизация Чебышева.

Введение

Важным этапом исследования движения каждой динамической системы с сосредоточенными параметрами в конечной окрестности нуля фазового пространства является преобразование ее в систему уравнений с уменьшенным количеством параметров, символьных констант [1–3]. Минимизация количества существенных констант упрощает последующий аналитический и численный анализ. Вначале обычно выполняется преобразование подобия – изменение масштабов переменных, затем выполняется замена переменных, соответствующая структуре уравнений. Для автономных уравнений возмущенного движения широко используется метод нормализации Пуанкаре–Дюлака, формального многочленного преобразования дифференциальных уравнений с сохранением в преобразованной системе множества неустранимых «резонансных» или близких к резонансным констант – коэффициентов при мономах. При этом сходимость рядов гарантирована лишь при весьма жестких ограничениях, поэтому метод относят в основном к асимптотическим методам [4–6]. В случае сходимости рядов формальная эквивалентность преобразованной и исходной систем становится аналитической эквивалентностью в некоторой области сходимости, которая может оказаться весьма малой. При практическом применении асимптотического метода рекомендуется проверка идентичности существенных динамических свойств исходной и преобразованной систем [2]. В [5, 7] рассмотрены, в частности, автономные системы с правыми частями в виде многочленов высокой степени, для которых развит метод многочленного преобразования с сохранением в преобразованной системе мономов с резонансными и близкими к резонансным индексами во избежание появления малых делителей, в [8] метод применен к системе управления.

В настоящей работе предлагается существенное изменение метода многочленных преобразований в направлении уменьшения невязок, повышения точности преобразованной модели. Уточнение преобразованной модели достигается тем, что в процессе выполнения преобразований остаточные члены уравнений, составленные из мономов высоких степеней, не отбрасываются, они аппроксимируются многочленами меньших степеней по методу экономизации Чебышева [9–13] и включаются в преобразованные уравнения, а к пренебрегаемым членам отнесены лишь погрешности этих аппроксимаций. Данный прием основан на очевидном свойстве каждого монома достаточно высокой степени содержать фазовые координаты в степенях $s \geq 3$, допускающих приближение многочленами меньших степеней с небольшой относительной погрешностью. Расчетные алгебраические формулы для констант модифицированного метода преобразований не рекуррентны, поэтому константы вычисляются с применением метода малого параметра, причем за порождающие решения алгебраической системы принимаются решения по методу Пуанкаре–Дюлака. Модифицированный метод приводит, в общем случае, к некоторым изменениям собственных значений матрицы линейной части преобразованной системы.

Постановка задачи

Рассмотрим систему дифференциальных уравнений с правыми частями в виде сумм однородных многочленов степеней 1, 2, ..., m с малыми коэффициентами при нелинейных членах:

$$\frac{dx_i}{dt} = \sum_{|\nu|=1}^{m'} X_\nu a_i^\nu, \quad i = 1, \dots, n, \quad x \in D. \quad (1)$$

Здесь $a_i^\nu = a_i^{(\nu_1 \dots \nu_n)} = O(\varepsilon)$ при $|\nu| \geq 2$; $\nu = (\nu_1 \dots \nu_n)$ – векторные индексы суммирования; $X_\nu = x_1^{\nu_1} \dots x_n^{\nu_n}$ – мономы степеней $|\nu| = \nu_1 + \dots + \nu_n$; $D = \{x = [x_1, \dots, x_n] \in R^n : |x_i| \leq r, \quad i = 1, \dots, n\}$ – окрестность нуля фазового пространства. Однородные линейные многочлены в (1) вида

$\sum_{|\nu|=1} x_\nu a_i^\nu = x_1 a_i^{e_1} + \dots + x_n a_i^{e_n} \equiv x_1 a_i^1 + \dots + x_n a_i^n$ записаны с применением единичных векторных индексов $e_j = (0 \dots 010 \dots 0)$, собственные числа $\lambda = [\lambda_1, \dots, \lambda_n]$ матрицы $A = [a_i^j]_1^n$ линейной части системы предполагаем существенно различными, $\lambda_i \neq \lambda_j$ при $i \neq j$.

Считаём, что система (1) описывает движение некоторого класса механических систем с сосредоточенными параметрами с пренебрежимо малыми погрешностями.

Ставится задача о многочленном преобразовании степени m фазовых переменных, где $m = \max(m', 2n)$, с изменёнными формулами для определения констант. Изменение состоит в том, что остаточными членами, составленными из мономов степеней больших, чем m , которые появляются в процессе преобразования, не пренебрегаем, сохраняем их приближенно в уравнениях в виде аппроксимирующих многочленов степени m , найденных методом экономизации Чебышева.

Замечание. Если система (1) получена из классических автономных уравнений возмущенного движения посредством приближения голоморфных функций частичными суммами в $O(\varepsilon)$ – окрестности нуля фазового пространства и масштабного преобразования окрестности в единичную область D , то в (1) можно считать $a_i^\nu = O(\varepsilon^{|\nu|-1})$ при $|\nu| \geq 2$, что не влияет на процесс преобразований.

Целесообразна проверка преобразованной модели с позиции сохранения существенных динамических свойств, например, методом функций Ляпунова [2, 7, 14].

Многочленные преобразования со встроенными экономизациями Чебышева

Введем в рассмотрение множество особых (резонансных) индексов $N_i = N_{i2} \cup N_{i3} \cup \dots \cup N_{im}$, где подмножества N_{ik} находятся как семейства целочисленных неотрицательных решений системы двух алгебраических уравнений:

$$N_{ik}(\lambda) = \left\{ (\mu_{1k}^i, \dots, \mu_{nk}^i) : \mu_{1k}^i \lambda_1 + \dots + \mu_{nk}^i \lambda_n - \lambda_i \approx 0, \mu_{1k}^i + \dots + \mu_{nk}^i = k \right\}, i = 1, \dots, n. \quad (2)$$

Введем замену фазовых переменных в форме многочленов назначаемой степени m с комплексными константами

$$y_i = \sum_{|\nu|=1}^m X_\nu b_i^\nu \equiv \sum_{j=1}^n x_j b_i^j + \sum_{|k|=2}^m X_\nu b_i^k, \quad m \geq \max(m', 2n), \quad i = 1, \dots, n, \quad (3)$$

с неособой матрицей $B = [b_i^j]_1^n$, с малыми коэффициентами $b_i^k = O(\varepsilon)$ при $|k| \geq 2$, $k = (k_1 \dots k_n)$. Назовем невязками $\delta_i(x)$ следующие дифференциальные выражения, вычисляемые на решениях системы (1) с подлежащими определению комплексными константами p_i^μ :

$$\delta_i = \frac{dy_i}{dt} - \lambda_i y_i - \sum_{\substack{|\mu|=2 \\ \mu \in N_i}}^m Y_\mu p_i^\mu \quad i = 1, \dots, n. \quad (4)$$

Ставится задача выбора коэффициентов преобразования (3) и резонансных коэффициентов p_i^μ из условия минимизации невязок δ_i .

В силу уравнений (1) и выражений (3) получаем невязки в виде разности двух многочленов степеней $(m' + m - 1)$ и m^2 вида

$$\delta_i = \sum_{j, \nu, \nu'} X_{\nu + \nu' - e_j} b_i^\nu a_j^{\nu'} \nu_j - \sum_{\nu'} \left(\sum_{\nu} X_\nu b_i^{\nu'} \right)^{\mu_1} \dots \left(\sum_{\nu} x_\nu b_i^{\nu'} \right)^{\mu_n} p_i^\mu, \quad i = 1, \dots, n. \quad (5)$$

Каждую функцию (5) представляем посредством приведения подобных членов в виде суммы однородных многочленов степеней $1, \dots, m$ и дополнительных многочленов $\beta_i(x)$ со степенями мономов $m+1, m+2, \dots, m^2$:

$$\delta_i(x) = \sum_{|\nu|=1}^m X_\nu h_i^\nu + \beta_i(x), \quad \text{при} \quad \beta_i = \sum_{|\nu|=m+1}^{m^2} X_\nu r_i^\nu, \quad \beta_i = O(\varepsilon^2). \quad (6)$$

Вносим изменение в классический метод преобразований. Вместо отбрасывания функций $\beta_i(x)$ аппроксимируем их многочленами степени m и присоединяем эти многочлены к первой сумме выражения (6), пренебрегаем лишь погрешностями этих аппроксимаций. Здесь используем очевидное утверждение: любой моном $x_\nu = x_1^{\nu_1} \dots x_n^{\nu_n}$ степени $|\nu| \geq m$ при $m \geq 2n+1$ содержит, по меньшей мере, один множитель $x_j^{\nu_j}$ в степени $\nu_j \geq 3$, в связи с чем его можно приблизить с небольшой погрешностью многочленом меньшей степени на единичном интервале по формулам экономизаций Чебышева [10–12]. Например, на

интервалах $-r \leq x_j \leq r$ с оценками погрешностей $\Delta = 0,25r^3; 0,13r^4; 0,06r^5; 0,03r^6$ имеем аппроксимации

$$x_j^3 \approx \frac{3}{4}r^2x_j, \quad x_j^4 \approx r^2x_j^2 - \frac{r^4}{8}, \quad x_j^5 \approx \frac{5}{4}r^2x_j^3 - \frac{5}{16}r^4x_j, \\ x_j^6 \approx \frac{3}{2}r^2x_j^4 - \frac{9}{16}r^4x_j^2 + \frac{1}{32}r^6.$$

В аппроксимациях некоторых мономов четных степеней могут выделяться постоянные слагаемые. Для исключения таких случаев используем альтернативные аппроксимации, например, $x_j^4 = x_jx_j^3 \approx \frac{3}{4}x_j^2r^2$, $x_j^6 \approx \frac{5}{4}x_j^4r^2 - \frac{5}{16}x_j^2r^4$. Процесс последовательных экономизаций можно заменить представлением мономов через функции Чебышева с отбрасыванием функций высоких степеней с малыми множителями [10–12]. В результате выполнения последовательности экономизаций все мономы степени $|v| > m$ аппроксимируются многочленами со степенями не превосходящими m .

Посредством выделения квадратичного множителя можно ценою некоторого понижения точности выполнить экономизации без линейных и свободных членов, например, $x_j^5 = x_j^2x_j^3 \approx 3x_j^3/4$. При двукратном понижении степени получаем $x_j^5 \approx 5x_j/8$, $x_j^6 \approx 5x_j^2/8$.

Допустим, что в (6) дополнительные многочлены высоких степеней $\beta_i(x) = O(\varepsilon^2)$ аппроксимированы многочленами степени m без выделения свободных членов:

$$\beta_i = \sum_{|v|=1}^m X_v c_i^v + \alpha_i(x), \quad i = 1, \dots, n, \quad x \in D. \quad (7)$$

Подставляя выражения (7) в (6), получаем невязки δ_i в форме многочленов от переменных x_j степени m с погрешностями $\alpha_i(x)$

$$\delta_i(x) = \sum_{|v|=1}^m X_v (h_i^v + c_i^v) + \alpha_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad x \in D. \quad (8)$$

Константы b_i^v, p_i^v будем определять из условий равенства нулю всех коэффициентов при X_v в выражениях (8):

$$h_i^v + \gamma c_i^v = 0, \quad v = (v_1, \dots, v_n): |v| = 1, \dots, m, \quad i = 1, \dots, n, \quad \gamma = 1, \quad (9)$$

где формальным множителем $\gamma = 1$ отмечены малые слагаемые $c_i^v = O(\varepsilon^2)$, выделенные из дополнительных многочленов высоких степеней.

Алгебраическую систему (9), содержащую неизвестные b_i^v, p_i^v , следует доопределить посредством назначения некоторых коэффициентов преобразования и преобразованной системы. Минимальное количество неустранимых констант p_i^u преобразованной системы определяется по множеству резонансных индексов вида (2). Потребуем приведения линейной части преобразованной системы к диагональному виду и обнуления всех коэффициентов p_i^v с нерезонансными индексами:

$$p_i^v = 0 \quad \forall v \notin N_i, \quad [p_i^e]_1^n \equiv [p_i^j]_1^n = \text{diag}[\lambda_1^*, \dots, \lambda_n^*], \quad \lambda_i^* = \lambda_i + \varepsilon^2 \theta_i, \quad i = 1, \dots, n. \quad (10)$$

Здесь слагаемые $\varepsilon^2 \theta_i$, выделенные из β_i , считаем малыми, не изменяющими множества индексов (2), т.е. $\{N_i(\lambda)\} = \{N_i(\lambda^*)\}$, $i = 1, \dots, n$. Из (4) согласно (8), (9), получаем преобразованную систему вида

$$dy_i/dt = \lambda_i^* y_i + \sum_{\mu \in N_i} Y_\mu p_i^\mu + \alpha_i(x), \quad Y_\mu = y_1^{\mu_1} \dots y_n^{\mu_n}, \quad i = 1, \dots, n,$$

где $\alpha_i(x) = O(\varepsilon^3)$ – погрешности аппроксимаций функций $\beta_i(x) = O(\varepsilon^2)$ с измененными значениями собственных чисел λ_i на λ_i^* . Итак, заменой фазовых переменных (3), при условии выполнения уравнений (9), (10), система (1) преобразуется в систему

$$dy_i/dt = \lambda_i^* y_i + \sum_{\mu \in N_i} Y_\mu p_i^\mu, \quad Y_\mu = y_1^{\mu_1} \dots y_n^{\mu_n}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (11)$$

При этом предполагаем, что эти изменения малы и не меняют множества индексов (2).

Система (11) имеет невязки $\alpha_i(x)$ на решениях исходной системы (1), примерно на порядок меньшие по сравнению с невязками в виде остаточных сумм известного метода многочленных преобразований.

Случай аппроксимации невязок без изменения линейных форм

Рассмотрим частный случай, когда применением альтернативных аппроксимаций остаточные члены не приводит к поправкам в линейную часть преобразованной системы. В таком случае аппроксимирующая алгебраическая система (9) не содержит поправок c_i^v при $|v|=1$:

$$h_i^v + \gamma c_i^v = 0, \quad |v| = 2, 3, \dots, m, \quad c_i^v|_{|v|=1} = 0, \quad i = 1, \dots, n.$$

В этом случае систему (1) и выражения (3), (4) целесообразно привести к виду с диагональной матрицей. Тогда упрощается замена переменных, а невязка по-прежнему имеет вид (4):

$$\frac{dx_i}{dt} = \lambda_i x_i + \sum_{|v|=2}^{m'} X_v a_i^v, \quad y_i = x_i + \sum_{|v|=2}^m X_v b_i^v, \quad i = 1, \dots, n,$$

$$\delta_i = \frac{dy_i}{dt} - \lambda_i y_i - \sum_{\substack{|\mu|=2 \\ \mu \in N_i}}^m y_1^{\mu_1} \dots y_n^{\mu_n} p_i^{(\mu_1 \dots \mu_n)}, \quad i = 1, \dots, n.$$

Получаем, временно опуская для краткости знаки суммирования:

$$\begin{aligned} \delta_i &= (\dot{x}_i + X_{v-eg} v_j b_i^v \dot{x}_j) - \lambda_i (x_i + X_v b_i^v) - (x_1 + X_v b_1^v)^{\mu_1} \dots (x_n + X_v b_n^v)^{\mu_n} p_i^{(\mu_1 \dots \mu_n)} = \\ &= X_v (a_i^v + (v_j \lambda_j - \lambda_i) b_i^v) - X_\mu p_i^\mu + X_{k-eg+v} v_i b_i^k b_i^{v'} - \Phi_i^{(3,m)} - \Phi_i^{(m+1,m^2)} \end{aligned}$$

где $\Phi_i^{(3,m)}, \Phi_i^{(m+1,m^2)}$ – многочлены со степенями мономов $(3, 4, \dots, m), (m+1, m+2, \dots, m^2)$ соответственно. Пусть методом экономизации Чебышева получены приближения

$$\Phi_i^{(m+1,m^2)} = \sum_{|v|=2}^m X c_i^v + \alpha_i(x).$$

Получаем выражения невязок

$$\delta_i = \sum_{|v|=2}^m X_v (a_i^v - (\lambda_i - \sum_{j=1}^n v_j \lambda_j) b_i^v - d_i^v - c_i^v) - \sum_{\substack{|\mu|=2 \\ \mu \in N_i}}^m X_\mu p_i^\mu + \alpha_i,$$

где d_i^v – коэффициенты многочленов $\Phi_i^{(3,m)}$. Потребуем тождественного равенства нулю всех коэффициентов многочленов степени m , т.е. – выполнения условий $\delta_i = \alpha_i$. Получаем алгебраические уравнения, в которых формально введем параметр $\gamma = 1$ перед малыми членами:

$$b_i^v = (a_i^v - d_i^v - \gamma c_i^v) / (\lambda_i - \sum_{j=1}^n v_j \lambda_j), \quad v = 2, 3, \dots, m, \quad v \notin N_i,$$

$$b_i^\mu = 0, \quad p_i^\mu = a_i^\mu - d_i^\mu - \gamma c_i^\mu, \quad \mu \in N_i, \quad i = 1, \dots, n.$$

Система нелинейных алгебраических уравнений решается методом итераций, причем за порождающее решение принимается решение классической системы, получаемой приравнением к нулю всех поправок экономизации Чебышева $c_i^v = 0$.

Пример. Система уравнений второго порядка

Рассмотрим систему двух дифференциальных уравнений с кубическими однородными формами и различными отрицательными корнями характеристического уравнения $\lambda_2 < \lambda_1 < 0$:

$$\dot{x}_i = \lambda_i x_i + \varepsilon X_i, \quad X_i = \sum_{|v|=3} x_1^{v_1} x_2^{v_2} a_i^{(v_1 v_2)}, \quad x \in D, \quad i = 1, 2,$$

где $D = \{x = (x_1, x_2) : |x_1| \leq r, |x_2| \leq r\}$. Предполагаем, что отсутствуют резонансные индексы третьей степени, определяемые из условий $v_1 \lambda_1 + v_2 \lambda_2 - \lambda_i \neq 0, \quad \forall |v| = v_1 + v_2 = 3, \quad i = 1, 2 \Rightarrow 3\lambda_1 \neq \lambda_2$.

Нелинейной заменой переменных с кубическими формами

$$y_i = x_i + \varepsilon U_i \quad \text{при} \quad U_i = \sum_{|k|=3} x_1^{k_1} x_2^{k_2} b_i^{(k_1 k_2)}, \quad i = 1, 2,$$

приводим систему к линейному виду, с точностью до невязок δ_i :

$$\dot{y}_i - \lambda_i y_i = \delta_i, \quad \text{при} \quad \delta_i = \varepsilon F_i + \varepsilon^2 \beta_i, \quad i = 1, 2, \quad (12)$$

где

$$F_i = X_i + \frac{\partial U_i}{\partial x_1} \lambda_1 x_1 + \frac{\partial U_i}{\partial x_2} \lambda_2 x_2 - \lambda_i U_i = \sum_{|v|=3} x_1^{v_1} x_2^{v_2} [a_i^{(v_1 v_2)} - \Lambda_i^{(v_1, v_2)} b_i^{(v_1, v_2)}],$$

$$\Lambda_i^{(v_1, v_2)} = \lambda_i - v_1 \lambda_1 - v_2 \lambda_2, \quad \beta_i = \frac{\partial U_i}{\partial x_1} \lambda_1 X_1 + \frac{\partial U_i}{\partial x_2} \lambda_2 X_2.$$

Имеем с переобозначениями индексов суммирования: $\nu_i \rightarrow \nu'_i$, и повторно $\nu'_1 \rightarrow \nu_1 - k_1 + 1$, $\nu'_2 \rightarrow \nu_2 - k_2$, а в другой сумме $\nu'_1 \rightarrow \nu_1 - k_1$, $\nu'_2 \rightarrow \nu_2 - k_2 + 1$:

$$\beta_i = \sum_{|k|=3} b_i^{(k,k_2)} \sum_{\nu'} (x_1^{k_1-1+\nu'_1} x_1^{k_2+\nu'_2} k_1 a_1^{(\nu'_1 \nu'_2)} + x_1^{k_1+\nu'_1} x_1^{k_2+\nu'_2-1} k_2 a_2^{(\nu'_1 \nu'_2)}) \equiv \sum_{|\nu|=5} x_1^{\nu_1} x_1^{\nu_2} h_i^{(\nu_1 \nu_2)},$$

$$h_i^{(\nu_1 \nu_2)} = \sum_{|k|=3} b_i^{(k,k_2)} \left(\sum_{\nu_1+\nu_2=5} k_1 a_1^{(\nu_1-k_1+1, \nu_2-k_2)} + k_2 a_2^{(\nu_1-k_1, \nu_2-k_2)} \right) =$$

$$= 3b_i^{(3,0)} a_1^{(\nu_1-2, \nu_2)} + b_i^{(2,1)} (2a_1^{(\nu_1-1, \nu_2-1)} + a_2^{(\nu_1-2, \nu_2)}) + b_i^{(1,2)} (a_1^{(\nu_1, \nu_2-2)} + 2a_1^{(\nu_1-1, \nu_2-1)}) + 3b_i^{(0,3)} a_2^{(\nu_1, \nu_2-2)}.$$

Аппроксимируя в D однородные формы β_i кубическими формами, получим:

$$\beta_i = f_i + \alpha_i \quad \text{при} \quad f_i = \sum_{|\nu|=3} x_1^{\nu_1} x_2^{\nu_2} c_i^{(\nu_1 \nu_2)}, \quad i = 1, 2.$$

$$\text{при } c_i^{(30)} = \frac{3}{4} h_i^{(50)}, \quad c_i^{(03)} = \frac{3}{4} h_i^{(05)}, \quad c_i^{(21)} = \frac{3}{4} (h_i^{(41)} + h_i^{(23)}), \quad c_i^{(13)} = \frac{3}{4} (h_i^{(32)} + h_i^{(14)})$$

Отметим, что коэффициенты $c_i^{(\nu_1 \nu_2)}$ линейно зависят от $b_i^{k_1 k_2}$. Потребуем выполнения условия $(\varepsilon F_i + \varepsilon^2 f) \equiv 0$ отсутствия в невязках кубических форм, тогда имеем $\delta_i = \varepsilon^2 \alpha_i$, получаем две алгебраические системы

$$a_i^{(\nu_1 \nu_2)} - \Lambda_i^{(\nu_1 \nu_2)} b_i^{(\nu_1 \nu_2)} + \varepsilon c_i^{(\nu_1 \nu_2)} = 0, \quad i = 1, 2. \quad (13)$$

Приближенное решение уравнений (13), определенное по методу малого параметра, имеет вид

$$\tilde{b}_i^{(\nu_1, \nu_2)} = a_i^{(\nu_1, \nu_2)} / \Lambda_i^{(\nu_1, \nu_2)}, \quad b_i^{(\nu_1, \nu_2)} = \tilde{b}_i^{(\nu_1, \nu_2)} + \varepsilon \tilde{c}_i^{(\nu_1, \nu_2)} / \Lambda_i^{(\nu_1, \nu_2)}, \quad i = 1, 2,$$

где $\tilde{c}_i^{(\nu_1, \nu_2)}$ – результат подстановки в коэффициенты $c_i^{(\nu_1, \nu_2)}$ выражений $\tilde{b}_i^{(\nu_1, \nu_2)}$. Дифференциальные уравнения (12) с точностью до невязок $\varepsilon^2 \alpha_i$ имеют вид

$$\dot{y}_i - \lambda_i y_i = 0, \quad i = 1, 2.$$

Заключение

Рассмотрена нелинейная автономная динамическая система с несколькими степенями свободы с правой частью в форме степенных многочленов в конечной окрестности положения равновесия. Методом нормализации в многочленном варианте выполнено преобразование. С целью повышения точности преобразованной модели остаточные члены высоких степеней включаются в преобразованную систему посредством аппроксимаций Чебышева многочленами меньших степеней. Метод продемонстрирован на примере.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 10-08-01046-а.

Литература

1. Каток А.Б., Хасселблат Б. Введение в теорию динамических систем с обзором последних достижений. – М.: МЦНМО, 2005. – 464 с.
2. Васильев С.Н., Козлов Р.И., Ульянов С.А. Анализ координатных и других преобразований моделей динамических систем методом редукции // Труды Института математики и механики. – УрО РАН, 2009. – Т. 15. – № 3. – С. 1–18.
3. Мельников В.Г. Энергетический метод параметрической идентификации тензоров инерции тел // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 1 (65). – С. 59–63.
4. Брюно А.Д. Степенная геометрия в алгебраических и дифференциальных уравнениях. – М.: Наука, Физматлит, 1998. – 288 с.
5. Мельников Г.И. О приближенном интегрировании уравнений возмущенного движения // Вестник Ленинградского государственного университета. – 1963. – № 19. – Вып. 14. – С. 112–123; 1964. – № 1. – Вып. 1. – С. 88–98.
6. Бибииков Ю.Н. Курс обыкновенных дифференциальных уравнений. – СПб: Лань, 2011. – 304 с.
7. Мельников Г.И. Динамика нелинейных механических и электромеханических систем. – Л.: Машиностроение, 1975. – 198 с.
8. Мельников В.Г. Многочленные преобразования нелинейных систем управления // Изв. вузов. Приборостроение. – 2007. – Т. 5. – № 50. – С. 20–25.
9. Melnikov V.G. Chebyshev economization in Poincare-Dulac transformations of nonlinear systems // Nonlinear Analysis. – 2005. – V. 63. – № (5–7). – P. 351–355.
10. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. – М.: Издательство физико-математической литературы, 1961. – 524 с.
11. Hamming R.W. Numerical methods for scientists and engineers. – Dover, 1986. – 721 p.

12. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения. – СПб: Лань, 2010. – 400 с.
13. Мельников В.Г. Применение метода экономизации К. Ланцоша при исследовании нелинейных колебаний механических систем // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2004. – Т. 50. – № 15. – С. 16–18.
14. Матросов В.М., Румянцев В.В., Карапетян А.В. Нелинейная механика. – М.: Физматлит, 2001. – 432 с.

Мельников Виталий Геннадьевич

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

УДК 531

АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

С.Е. Иванов

Предложен алгоритм математической и программной реализации метода исследования нелинейных динамических систем с тремя степенями свободы. Рассматривается нелинейная математическая модель динамической системы, которая содержит полиномы до четвертой степени от фазовых переменных с постоянными и периодическими параметрами. В результате применения метода нелинейная математическая модель движения системы приводится к автономному виду и определяются существенные параметры движения динамической системы. Приводится алгоритм модифицированного метода многочленных преобразований и алгоритмические формулы программной реализации метода, посредством которых проведен анализ приборной динамической системы с тремя степенями свободы.

Ключевые слова: алгоритм аналитического метода преобразований, методы исследования, нелинейные системы с тремя степенями свободы.

Введение

В работе предлагается алгоритм метода многочленных преобразований с последующими экспоненциальными преобразованиями и алгоритмические формулы, на основе которых автором разработан пакет программ для исследования нелинейных динамических систем с тремя степенями свободы [1]. Данный алгоритм метода реализован посредством универсальной системы Mathematica с использованием математических библиотек. Рассматриваются нелинейные динамические системы, которые описываются системой дифференциальных уравнений шестого порядка с нелинейной частью в виде полинома четвертой степени относительно фазовых координат с постоянными и периодическими коэффициентами [2]. В результате применения модифицированного метода многочленных преобразований нелинейная математическая модель динамической системы приводится к автономному виду и находятся существенные константы, определяющие свойства динамической системы [3]. Метод применен к исследованию математической модели приборной системы с малыми нелинейными частями, которые существенно влияют на решение и полностью учитываются в предлагаемом методе [4]. Точность получаемых решений с помощью аналитического метода преобразований контролируется посредством сравнения с решением, получаемым численным методом Рунге–Кутты.

Метод многочленных преобразований выполняет минимизацию количества параметров нелинейной динамической системы. В преобразованной автономной системе содержится на порядок меньше ненулевых коэффициентов, чем в исходной системе. Минимизация количества ненулевых коэффициентов упрощает исследование переходных и установившихся процессов нелинейных динамических систем [5]. Предложенные алгоритмические формулы метода и составленный пакет программ позволяют выполнять исследование установившихся и переходных режимов нелинейных динамических систем.

Нелинейная динамическая система

Рассматриваются динамические системы, которые описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями с нелинейными членами в форме многочленов от фазовых переменных с постоянными и периодическими параметрами [6]. Для исследования таких систем применяется метод многочленных преобразований. Применение этого метода связано с большим объемом трудоемких выкладок, что приводит к необходимости создания программ, позволяющих выполнять расчеты средствами современной вычислительной техники. Автором составлен комплекс программ для реализации метода на языке программирования высокого уровня Mathematica. Разработанные программы позволяют проводить исследование динамических нелинейных систем, получать аналитический вид решения и преобразовывать систему к автономному виду.

Рассмотрим систему дифференциальных уравнений второго порядка с правыми частями в виде многочленов до четвертой степени относительно фазовых переменных с постоянными и периодическими параметрами, представленную в матричном виде:

$$I\ddot{q} + B\dot{q} + Cq = \sum_{|v|=1}^4 h_v \cos(\omega t)^{v_1} \sin(\omega t)^{v_2} q_1^{v_3} q_2^{v_4} q_3^{v_5} \dot{q}_1^{v_6} \dot{q}_2^{v_7} \dot{q}_3^{v_8}, \quad (1)$$

где $q = [q_1, q_2, q_3]^T$ – вектор обобщенных координат; I, B, C – матрицы третьего порядка; $v = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8)$ – векторный индекс, $|v| = v_1 + v_2 + \dots + v_8$.

Для записи на языке программирования выражение суммы коэффициентов с векторным индексом представлено в следующем виде:

$$\sum_{v=1}^4 h_{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8} = \sum_{i_8=1}^4 \sum_{i_7=0}^{i_8} \sum_{i_6=0}^{i_7} \sum_{i_5=0}^{i_6} \sum_{i_4=0}^{i_5} \sum_{i_3=0}^{i_4} \sum_{i_2=0}^{i_3} \sum_{i_1=0}^{i_2} h_{i_1, i_2-i_1, i_3-i_2, i_4-i_3, i_5-i_4, i_6-i_5, i_7-i_6, i_8-i_7}.$$

Предполагается, что система содержит малые нелинейные части $|h_v^S| < \varepsilon$.

Алгоритм метода

Запишем алгоритмические формулы метода многочленных преобразований, применимые для программной реализации метода. Применим комплексно-сопряженные переменные для записи периодических функций в исходной системе:

$$q_0 = \exp(i\omega t) \text{ и } \bar{q}_0 = \exp(-i\omega t), \quad \lambda_1 = i\omega.$$

Запишем в новых переменных исходную систему:

$$\cos(\omega t) = \frac{1}{2}(q_0 + \bar{q}_0) \text{ и } \sin(\omega t) = \frac{1}{2i}(q_0 - \bar{q}_0). \quad (2)$$

Систему дифференциальных уравнений (1) можно представить в виде системы восьми дифференциальных уравнений первого порядка в нормальной форме Коши с фазовым вектором $X = [q_0, \bar{q}_0, q_1, q_2, q_3, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3]^T$

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} W & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I \\ A^{-1}H & -A^{-1}C & -A^{-1}B \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ A^{-1}G \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где постоянная квадратная блочная матрица порядка имеет вид $W = \begin{bmatrix} i\omega & 0 \\ 0 & -i\omega \end{bmatrix}$. Выполним линейное преобразование $Y = DX$, в результате которого линейная часть системы (3) приводится к диагональному виду:

$$\dot{Y} = \Lambda Y + R|_{X \rightarrow D^{-1}Y}, \text{ где } \Lambda = \text{diag}[\lambda_1, \bar{\lambda}_1, \dots, \lambda_4, \bar{\lambda}_4]. \quad (4)$$

Применим многочленное преобразование к системе (4), содержащее многочлены четвертой степени:

$$y_S = z_S + \sum_{|v|=2}^4 a_v^S Z^v, \quad (S = 3, \dots, 8), \quad Z^v \equiv z_1^{v_1} z_2^{v_2} \dots z_8^{v_8},$$

где a_v^S – неизвестные коэффициенты преобразования.

В результате многочленного преобразования система (4) приводится к автономному виду:

$$\dot{z}_S = \lambda_S z_S + \sum_{|v|=2}^4 q_v^S Z^v, \quad (S = 3, \dots, 8), \quad (5)$$

где q_v^S – искомые коэффициенты преобразованной системы.

Автором получены алгоритмические формулы для расчета коэффициентов преобразования и преобразованной системы, которые применены в составленном пакете программ:

$$\sum_{|v|=2}^4 q_v^S Z^v + \sum_{|v|=2}^4 (a_v^S Z^v (\sum_{k=1}^8 \lambda_k v_k - \lambda_S)) + \sum_{|v|=2}^4 (a_v^S Z^v \sum_{k=3}^8 v_k z_k^{-1} \sum_{|\mu|=2}^4 q_\mu^k Z^\mu) = R_S(Z), \quad (S = 3, \dots, 8).$$

Для нахождения особых значений векторного индекса при фиксированном S необходимо найти решение двух уравнений [7]:

$$\sum_{k=1}^8 \lambda_k v_k - \lambda_S \approx 0, \quad \sum_{k=1}^8 v_k = 2, 3, 4. \quad (6)$$

Постоянные q_v^S приравняем к нулю при неособых значениях индексов; при таких значениях вычисляют постоянные a_v^S . И наоборот, при особых значениях индексов полагают коэффициенты a_v^S равными нулю и вычисляют q_v^S .

В нерезонансном случае из уравнений (6) находим следующие особые индексы:

при $q_v^3: v = (00100011), v = (00101100), v = (00210000), v = (11100000)$,
 при $q_v^4: v = (00010011), v = (00011100), v = (00120000), v = (11010000)$,
 при $q_v^5: v = (00001011), v = (00002100), v = (00111000), v = (11001000)$,
 при $q_v^6: v = (00000111), v = (00001200), v = (00110100), v = (11000100)$,
 при $q_v^7: v = (00000021), v = (00001110), v = (00110010), v = (11000010)$,
 при $q_v^8: v = (00000012), v = (00001101), v = (00110001), v = (11000001)$.

Для получения аналитического решения автономной системы (5) выполним замену переменных:
 $z_s = \rho_s \exp(i(t \operatorname{Im} \lambda_s + \theta_s)), \bar{z}_{s+1} = \rho_s \exp(i(t \operatorname{Im} \lambda_{s+1} - \theta_s)), S = 3, 5, 7; z_{1,2} \equiv \exp(\pm i t \omega)$.

В результате получаем дифференциальное уравнение

$$\dot{\rho}_s = \operatorname{Re}(\lambda_s) \rho_s + \operatorname{Re}(\psi_s), \quad \dot{\theta}_s = \rho_s^{-1} \operatorname{Im}(\psi_s), \quad S = 3, 5, 7;$$

$$\psi_s = \sum_{|v|=2}^4 q_v^s \rho_3^{v_3+v_4} \rho_5^{v_5+v_6} \rho_7^{v_7+v_8} \exp(i(\theta_3(v_3-v_4) + \theta_5(v_5-v_6) + \theta_7(v_7-v_8) - \theta_s)). \quad (7)$$

В нерезонансном случае [8] экспонента не входит в систему (7), так как ее степень равна нулю. Приравняв к нулю правые части системы (7), находим стационарные решения. Для получения решения системы (1) в исходных переменных выразим вектор Y по формулам замены, обратной линейной (2):

$$X = D^{-1}Y.$$

Получив обобщенные координаты системы решение можно представить в графическом виде.

В результате применения метода для анализа динамических систем на базе разработанного автором пакета программ были получены подробные качественные и количественные характеристики изучаемых динамических систем.

Заключение

В работе приведен алгоритм для программной реализации метода исследования нелинейных динамических систем с тремя степенями свободы. Выведены алгоритмические формулы метода и разработан пакет программ для исследования методом нелинейных задач. В результате применения метода многочленных преобразований нелинейная периодическая система приводится к автономному виду, получены установившиеся и переходные режимы динамических систем в условиях периодического внешнего воздействия. Определены существенные параметры динамической системы, характеризующие переходные процессы и установившиеся режимы системы.

Приведенный алгоритм реализован в созданных программах на языке программирования высокого уровня Mathematica. Для приборных динамических систем с тремя степенями свободы построены графики, которые показали точность получаемых результатов и применимость метода к широкому кругу задач общего вида (1).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 10-08-01046-а.

Литература

1. Бабаков И.М. Теория колебаний. – М.: Дрофа. – 2004. – 591 с.
2. Зиновьев Н.М., Мяснянкин Ю.М. Введение в теорию колебаний конструкций: Учебное пособие. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 2005. – 35 с.
3. Иванов С.Е. Определение установившихся режимов работы виброзащитной системы с двумя степенями свободы // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 4 (68). – С. 44–46.
4. Иванов С.Е. Исследование нелинейных динамических систем с тремя степенями свободы // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 4 (74). – С. 62–64.
5. Иванов С.Е. О реализации численно-аналитического метода многочленных преобразований на компьютере // Современные технологии: Труды молодых ученых ИТМО. – СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2001. – С. 138–141.
6. Кузнецов А.П. Нелинейные колебания: Учебное пособие. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2002. – 292 с.
7. Мельников Г.И. Динамика нелинейных механических и электромеханических систем. – Л.: Машиностроение, 1975. – 198 с.
8. Мельников В.Г., Мельников Г.И., Иванов С.Е. Компьютерные технологии в механике приборных систем: Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 127 с.

Иванов Сергей Евгеньевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, sivanov@mail.ifmo.ru

УДК 531.383-11:531.714.7

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ УПОРОВ В МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПАХ

Д.П. Елисеев, Д.В. Розенцвейн

Разработана методика оптимизации расположения упоров, ограничивающих перемещения в микромеханическом гироскопе. Предложены критерии оптимизации, сформулирован перечень варьируемых параметров для системы упоров. Выполнены расчеты для моделей микромеханических гироскопов с различными упругими подвесами методом конечно-элементного анализа, подтвердившие возможность использования разработанной методики для оптимизации числа и расположения упоров.

Ключевые слова: микромеханический гироскоп, упругий подвес, динамическая нагрузка.

Введение

В конструкциях микромеханических гироскопов (ММГ) для исключения замыкания электродов электростатических датчиков и уменьшения напряжений при расширенном динамическом диапазоне используют ограничители перемещения – упоры.

В настоящей работе рассматривается микромеханический гироскоп RR-типа, разработанный в ЦНИИ «Электроприбор» [1]. Его конструкция представляет собой инерционное тело (ИТ) в виде диска, закрепленного на основании посредством упругих элементов (рис. 1). ИТ в автоколебательном режиме совершает первичные угловые колебания в плоскости диска вокруг оси X , возбуждаемые гребенчатым электростатическим двигателем. При наличии угловой скорости основания Ω возникают вторичные угловые колебания вокруг оси Y с выходом из плоскости ИТ, амплитуда которых является мерой угловой скорости [2]. Эти колебания измеряются емкостными датчиками системы съема, расположенной под ИТ.

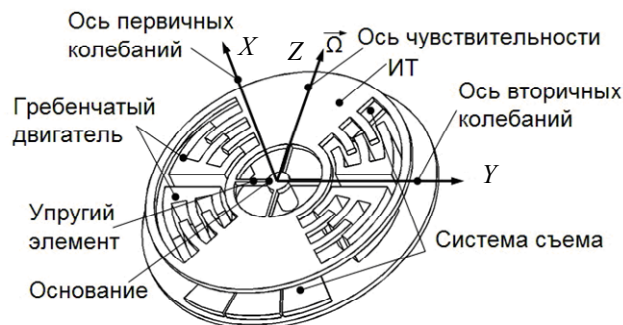


Рис. 1. Конструктивная схема ММГ

Расположение упоров в действующей конструкции осуществлено методом подбора. Их введением достигнуты показатели ударопрочности конструкции $10^5 g$ при наличии трех пар упоров [3]. Чтобы имеющимися средствами достичь максимальных динамических диапазонов для ММГ, необходимо провести оптимизацию расположения упоров. Целью работы является разработка методики оптимального расположения ограничителей перемещения ИТ ММГ. Ниже приводятся критерии, методика и численные расчеты оптимизации расположения упоров в ММГ RR-типа с подвесами трех типов (рис. 2) при нагружении перпендикулярно плоскости диска. Предложенные расчеты справедливы и для других типов ММГ.

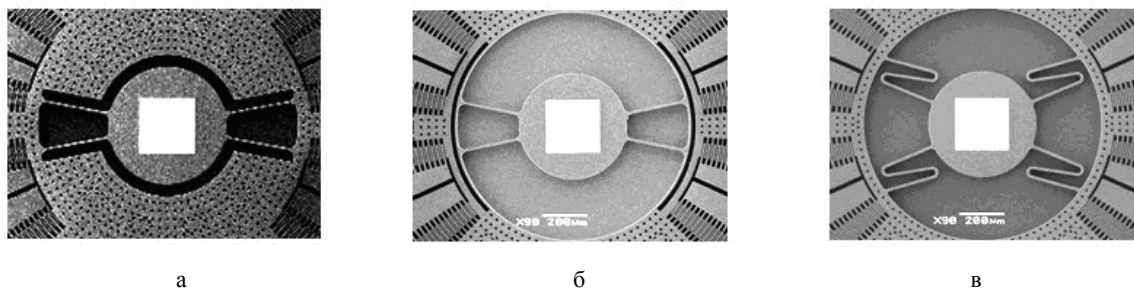


Рис. 2. Схемы упругих подвесов ММГ (центральная часть датчика): типа А (а); типа Б (б); типа В (в)

Критерии оптимизации ограничителей перемещения

Для определения оптимального расположения упоров использовались следующие критерии, определяющие качество ММГ:

- минимизация напряжений, возникающих во всей зоне упругого подвеса при воздействии динамической нагрузки;
- минимизация количества упоров для повышения технологичности изделия.

Наличие упоров не должно мешать свободному перемещению ИТ ММГ по оси вторичных колебаний (рис. 1) в том диапазоне измерений, для которого он рассчитан, поэтому высота упоров оговаривается из условия расстояния между ИТ и обкладкой электростатического датчика на основании. Необходимо проводить расчеты как для нулевого положения ИТ, так и для рабочего положения. В настоящей работе рабочее положение характеризуется поворотом ИТ относительно оси первичных колебаний на 1° (максимальная амплитуда колебания), вследствие чего возникают дополнительные напряжения в упругом подвесе.

На основании изложенных критериев определяются параметры оптимизации системы упоров в ММГ, для которых проводится оптимизация (рис. 3):

- количество упоров;
- угол расположения упоров относительно оси OZ;
- диаметр установки упоров относительно центра ММГ.

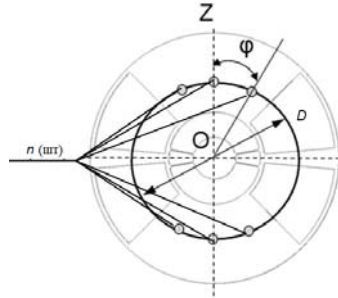


Рис. 3. Параметры оптимизации: φ – угол между осью OZ и упором; D – диаметр расположения упоров; n – количество упоров

Методика оптимизации ограничителей перемещения и результаты расчета с различными упругими подвесами

Разработанная методика оптимизации параметров расположения упоров в ММГ представляет собой последовательность расчетов и анализа полученных результатов. Расчеты проводились в приложении Pro/MECHANICA программного пакета Pro/ENGINEER. Начальные условия по задаваемым нагрузкам получены из анализа расчетных данных для критичных напряжений в моделях ММГ с предложенными упругими подвесами без упоров и с учетом поворота ИТ относительно оси первичных колебаний на угол 1° (рис. 4). Затем в конструкцию вводятся два упора (по одному упору под каждую обкладку электростатического датчика). Далее расчет ведется согласно алгоритму, представленному на рис. 5.

На каждом этапе расчета проводится анализ зависимостей напряжений σ , возникающих в конструкции, от исследуемого параметра. Окончательный выбор параметра производится по критерию наименьшего напряжения, и дальнейший расчет проводится с учетом изменения параметров. При этом за допустимый уровень напряжений в поликристаллическом кремнии принято значение $\sigma_{\text{доп.}} = 500 \text{ МПа}$.

После этого осуществляется расчет возникающих напряжений от действующей нагрузки для рассчитанных параметров. Методика предусматривает многопроходный анализ, с учетом изменения количества упоров. Результаты для каждого прохода фиксируются и анализируются для максимальных нагрузок при заданном количестве упоров. На рис. 6 представлены графики изменения напряжений от задаваемой нагрузки в конструкциях ММГ с тремя различными подвесами, с варьируемым числом упоров.

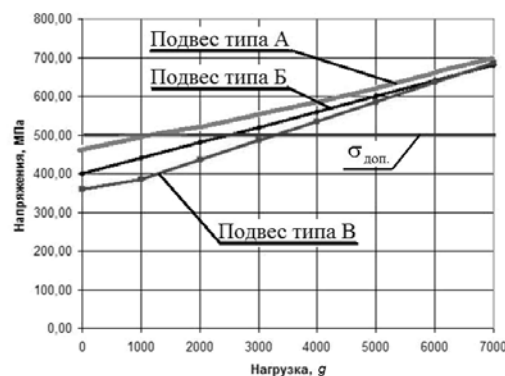


Рис. 4. Зависимость напряжений в упругом подвесе ММГ от действующей нагрузки без наличия упоров; $\sigma_{\text{доп.}}$ – допустимые напряжения для кремния

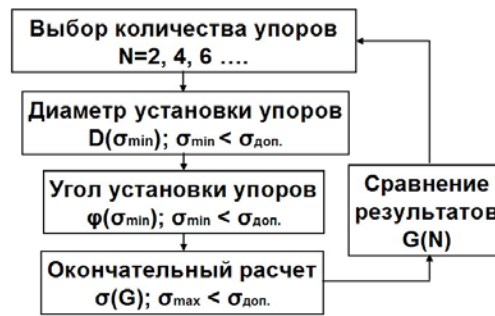


Рис. 5. Методика оптимизации упоров в ММГ

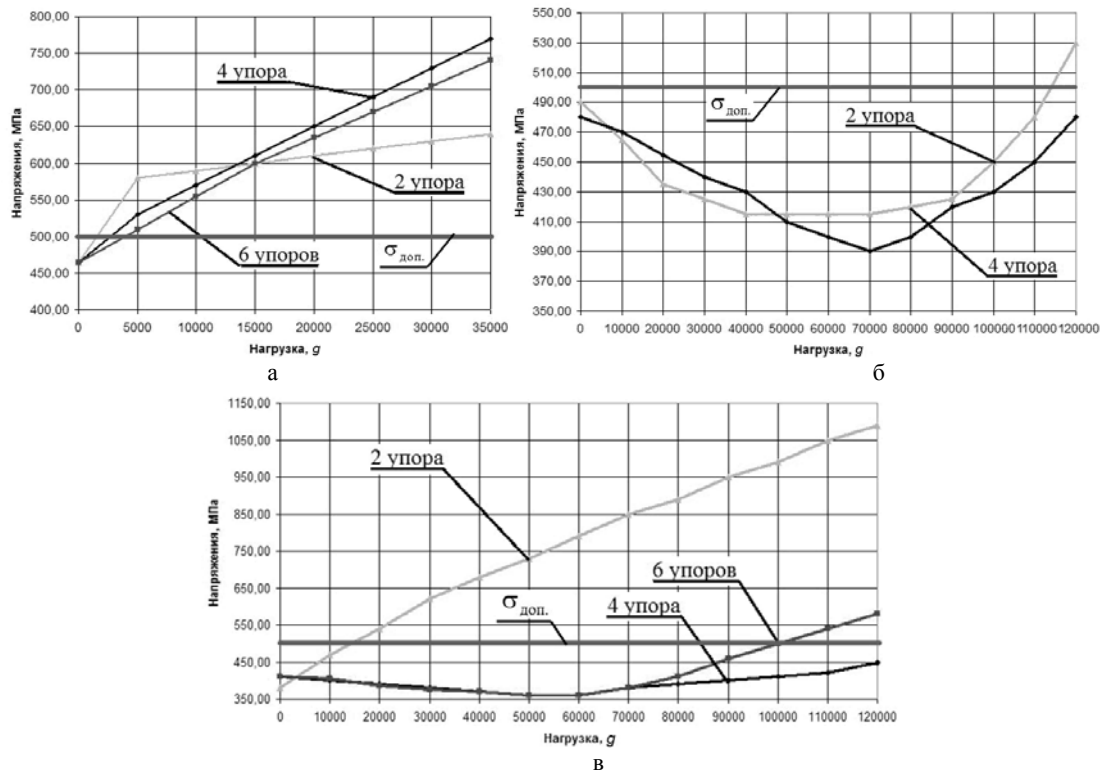


Рис. 6. Изменение напряжений от нагрузки для ММГ: с подвесом типа А и наличием 2, 4 или 6 упоров (а); б) с подвесом типа Б и наличием 2-х или 4-х упоров (б); с подвесом типа В и наличием 2, 4 или 6 упоров (в); $\sigma_{\text{доп.}}$ – допустимые напряжения для кремния

По графикам видно, что подвес типа А (рис. 2) наиболее чувствителен к нагрузкам, перпендикулярным плоскости диска. Применение упоров для данной конструкции не дает значительного увеличения ударопрочности из-за высокой жесткости подвеса.

Для подвеса типа Б (рис. 2) применение двух упоров уже дает значительный прирост ударостойкости – ММГ способен выдержать удары до 10^5 г.

По результатам оптимизации подвес типа В (рис. 2) можно признать компромиссным решением по жесткости. Он достаточно мягкий, чтобы при использовании упоров ММГ выдерживал удары до 10^5 г, и при этом относительно жесткий и имеет высокую добротность [4].

Падение напряжений в конструкции при росте нагрузки объясняется тем, что сила, действующая перпендикулярно плоскости диска, разгружает подвес ММГ от напряжений, вызванных рабочим режимом – поворотом ИТ на 1° . На рис. 7 представлены напряжения в подвеса типа Б (рис. 2) при использовании двух упоров. По этим данным можно судить о характере излома и изгиба торсионов. При меньшей нагрузке ротор гироскопа проседает, «садится» на упоры и тянет за собой торсионы, изгибая их вниз, в сторону установки упоров. Напряжения, созданные таким образом, «разгружают» подвес ротора от напряжений, создаваемых при рабочем режиме гироскопа – повороте ротора на угол 1° . При увеличении нагрузки перемещение ротора увеличивается, при этом он не просто «садится» на упоры, а выгибается на них, что приводит к выгибанию и торсионов, т.е. они деформируются в сторону, противоположную установке упоров.

Стоит отметить, что при отсутствии рабочей деформации подвеса зависимость напряжений от внешней нагрузки становится линейной.

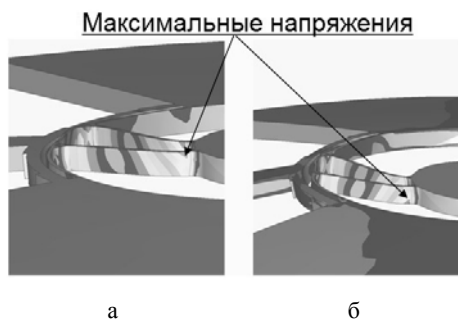


Рис. 7. Напряжения в подвесе ММГ типа Б: при нагрузке 25000 g (а); при нагрузке 90000 g (б)

Закключение

Предложена методика оптимизации расположения упоров по критерию минимизации напряжения в упругом подвесе микромеханического гироскопа и области контактных взаимодействий инерционного тела с упорами. Для гироскопа RR-типа упоры располагаются радиально под обкладками электростатических датчиков вторичных колебаний. Оптимизация в таком случае представляет собой автоматизированный подбор параметров топологии упоров: количество, диаметр расположения упоров и угол между ними. При оптимизации получены параметры, снижающие напряжения в упругом подвесе при нагрузках, перпендикулярных плоскости диска микромеханического гироскопа, и позволяющие повысить ударопрочность до $10^5 g$ при использовании одной пары упоров.

На основе разработанной методики возможно создание программы автоматического определения оптимального расположения упоров в конструкции микромеханического гироскопа, которая дополнит используемые компьютерные средства проектирования микромеханических гироскопов [5].

Авторы выражают благодарность научному руководителю М.И. Евстифееву за помощь в подготовке статьи.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №10-08-00153а.

Литература

1. Пешехонов В.Г. Микромеханический гироскоп, разрабатываемый в ЦНИИ «Электроприбор» // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 2. – С. 29–31.
2. Распопов В.Я. Микромеханические приборы: Учебное пособие. – Тула: Гриф и К., 2004. – 476 с.
3. Евстифеев М.И., Розенцвейн Д.В. Анализ контактных взаимодействий в микромеханических гироскопах // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 4 (68). – С. 46–50.
4. Евстифеев М.И. Результаты экспериментального исследования влияния линейных перегрузок на характеристики ММГ RR-типа // Гироскопия и навигация. – 2010. – № 2. – С. 100.
5. Евстифеев М.И. Анализ компьютерных средств проектирования микромеханических гироскопов с позиций мехатроники // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 2. – С. 31–36.

Елисеев Даниил Павлович

– ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», инженер-конструктор,
eliseev.dp@gmail.com

Розенцвейн Дмитрий Владимирович

– ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», научный сотрудник,
Rosenzwein@mail.ru

УДК 678.0675:621.892

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ФУЛЛЕРОИДНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Д.В. Пихуров, В.В. Зуев

Исследовано влияние фуллероидных модификаторов и углеродных волокон на трибологические свойства полимерных нанокомпозиов на основе термопластичных (полиамид 6) полимерных матриц. Показано, что введение фуллероидных модификаторов позволяет значительно снизить коэффициент трения полимерных композиций при повышении их механических характеристик. Использование углеродных волокон для модификации полиамида 6 при росте механических характеристик приводит к росту коэффициента трения по стали более чем вдвое по сравнению с исходной полимерной матрицей.

Ключевые слова: фуллерен C_{60} , полиамид 6, нанокомпозиы, трибологические свойства, коэффициент трения.

Введение

Надежность и долговечность узлов и механизмов во многом определяется явлениями трения и износа. Внедрение новых конструкционных материалов обеспечивает создание технических изделий с заданными эксплуатационными характеристиками, причем важное место среди этих материалов занимают полимерные нанокомпозиы. Преимуществом полимерных нанокомпозиов как материалов для узлов трения являются их повышенные прочностные характеристики, связанные с особенностями взаимодействия полимер–наночастица [1]. Повышение прочностных характеристик полимерных материалов обычно приводит к снижению коэффициента трения и износа в парах трения [2]. Однако эта закономерность не выполняется для полимерных композиов, наполненных микроразмерными наполнителями (в частности, волокнами) [3]. Это связано с тем, что в процессе износа микроразмерные наполнители вырываются из полимерной матрицы, что приводит к росту абразивных свойств поверхности и, как следствие, к росту коэффициента трения. Это проблему можно решить при использовании полимерных нанокомпозиов, так как наночастицы прочнее удерживаются в матрице, и их отрыв не приводит к изменению свойств микроповерхности (образованию задиров). Целью настоящей работы является сравнительное изучение трибологических свойств полимерных нанокомпозиов на основе полиамида 6 (ПА-6), модифицированного микроразмерными наполнителями (углеродные волокна), микроразмерными наполнителями, содержащими наночастицы (фуллереновая сажа), наночастицами–наполнителями (фуллерен C_{60}).

Экспериментальная часть

Полимерные нанокомпозиы получали методом полимеризации *in situ* в соответствии с методом [4] после смешивания наполнителя и мономера, и смешением в экструдере готового ПА-6 марки Волгамид® 32 (ПА-6-210/310 [5]) с наполнителем. В качестве наполнителей использовались фуллерены C_{60} (чистота 99,0%) и фуллероидная сажа (содержание фуллеренов 10,5%; 68% фуллерена C_{60} , 30% фуллерена C_{70} по весу, сумма высших фуллеренов около 2%) производства закрытого акционерного общества «Инновации Ленинградских институтов и предприятий» (Санкт-Петербург). Фуллероидная сажа представляет собой ультрадисперсный углерод – продукт сжигания графитовых электродов в дуге в атмосфере инертного газа со средним размером частиц 0,5–2,0 мкм. Фуллероидная сажа является основным сырьем для получения фуллеренов. Как наполнитель было использовано фракционированное рубленое вискозное углеродное волокно (средняя длина 400 мкм) производственного объединения «Химволокно» (Светлогорск, Белоруссия).

Испытание на машине трения МТУ-01 проводили по схеме «ролик–пластина». Ролик диаметром $D = 19$ мм изготовлен из стали марки 40Х, термообработанной на твердость примерно 58 HRC. Верхний ролик вращался с частотой $n=60$ об/мин, что соответствовало линейной скорости скольжения 0,06 м/с. Ролик при трении прижимался к пластине размером $40 \times 40 \times 5$ мм с усилием 400 Н.

Модуль Юнга и предел прочности определяли также на разрывной машине UTS 10 (UTStestsyste, Германия) при сжатии для образцов в виде полуцилиндра диаметром 8–9 мм и высотой 9–12 мм в интервале нагрузок от 0,001 Н до 10 кН и диапазоне скоростей деформирования образцов от 1 мкм/мин до 1 м/мин. Все измерения проводились для серий из не менее чем 5 образцов, полученных при разных синтезах нанокомпозиов.

Результаты и их обсуждение

В качестве термопластичной матрицы был выбран ПА-6 как полимер, широко применяемый для изготовления подшипников скольжения. Оптимальным способом получения нанокомпозиов является

полимеризация *in situ* [6], так как другие методы их создания связаны с трудно преодолимыми проблемами агрегации частиц наполнителя, затрудняющей их равномерное распределение в полимерной матрице. В то же время смешение готового полимера с наполнителем в экструдере является наиболее распространенным методом приготовления полимерных композитов, поэтому нами были получены полимерные композиции с использованием обоих методов. ПА-6 получают анионной полимеризацией с использованием металлического натрия в качестве инициатора и толуилендиизоцианата в качестве сокатализатора [7]. Фуллерен C_{60} химически неустойчив в этих условиях, и в результате при получении полимерных композитов методом полимеризации *in situ* получается химически модифицированный полимер, в котором наночастицы химически связаны с полимерной матрицей. Это тем более делает интересным сравнение трибологических свойств композиций, полученных разными методами. Как показали ранее проведенные авторами исследования [4], введение фуллерена C_{60} в матрицу ПА-6 при синтезе методом полимеризации *in situ* обеспечивает рост модуля Юнга и прочности примерно на 20% при уровне наполнения 0,01–0,1 вес.%. Нами были проведены подобные испытания для полимерных нанокомпозиов, полученных методом смешения расплава полимера с другими компонентами в экструдере. Данные испытаний приведены в таблице. Как видно из приведенных данных, метод смешения в расплаве не приводит к существенному росту прочностных характеристик ПА-6 при содержании фуллерена C_{60} 0,01 вес.% (рост на 3%); введение и фуллерена C_{60} , и фуллереновой сажи в количествах 1 вес.% приводит к падению механических свойств. Резкое падение механических характеристик ПА-6, наполненного 1 вес.% фуллерена C_{60} , связано с тем, что недостаточно равномерное распределение фуллерена C_{60} в полимерной матрице вызвало необходимость введения совместителя (Эрукамид 0,05 вес.%), который одновременно действует как пластификатор и препятствует кристаллизации ПА-6, что и приводит к падению механических характеристик. Снижение механических свойств нанокомпозиов при больших степенях наполнения обусловлено неравномерным распределением наполнителя в полимерной матрице [8].

Содержание модификатора	Модуль Юнга (Е), МПа	Разрушающее усилие (σ_n), МПа	Удлинение (ϵ), %	Коэффициент трения, (η)
ПА-6 без добавок	693 ± 17	63 ± 1	290 ± 6	0,27–0,31
C_{60} 0,01 вес.%	714 ± 22	65 ± 1	301 ± 6	0,185–0,19
C_{60} 1 вес.% ; Эрукамид 0,05 вес.%	265 ± 14	11 ± 1	287 ± 2	0,27–0,3
Фуллереновая сажа 1 вес.%	622 ± 45	62 ± 1	286 ± 14	0,29–0,32

Таблица. Механические свойства нанокомпозиов на основе ПА-6, полученного методом экструдирования

Авторами были исследованы трибологические свойства полимерных нанокомпозиов (рис. 1–3). Для композита (0,01 вес.% фуллерена C_{60}), полученного методом полимеризации *in situ*, происходит существенное снижение коэффициента трения (с $0,30 \pm 0,02$ до $0,19 \pm 0,05$) по сравнению с чистым ПА-6, синтезированным в аналогичных условиях. Это можно связать с ростом механической прочности полимерного нанокомпозиата. Однако для ПА-6, наполненного 10 вес.% углеродного волокна, наблюдается существенный рост коэффициента трения (до $0,55 \pm 0,05$). Для объяснения полученного результата нами были изучены оптические фотографии пятен износа (рис. 4).

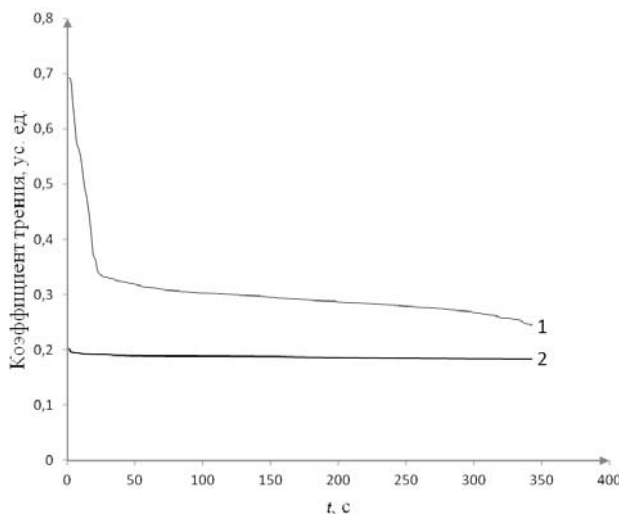


Рис. 1. Зависимость величины коэффициента трения от времени для чистого ПА-6 (1) и ПА-6 с 0,01 вес.% фуллеренов C_{60} (2), полученных методом полимеризации *in situ*

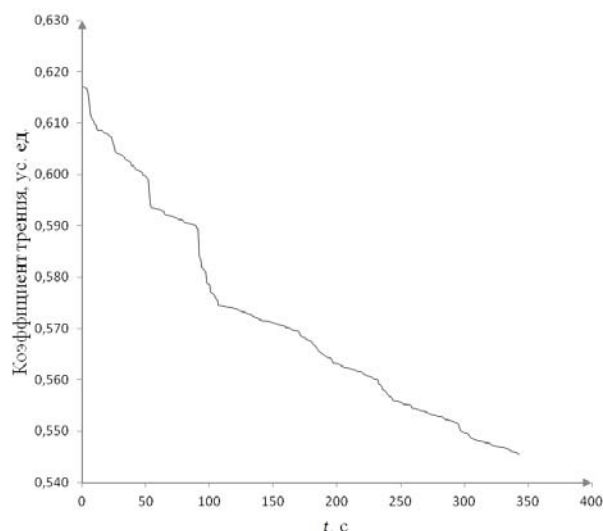


Рис. 2. Зависимость величины коэффициента трения от времени для ПА-6 с 10 вес.% углеродных волокон, полученного методом полимеризации *in situ*

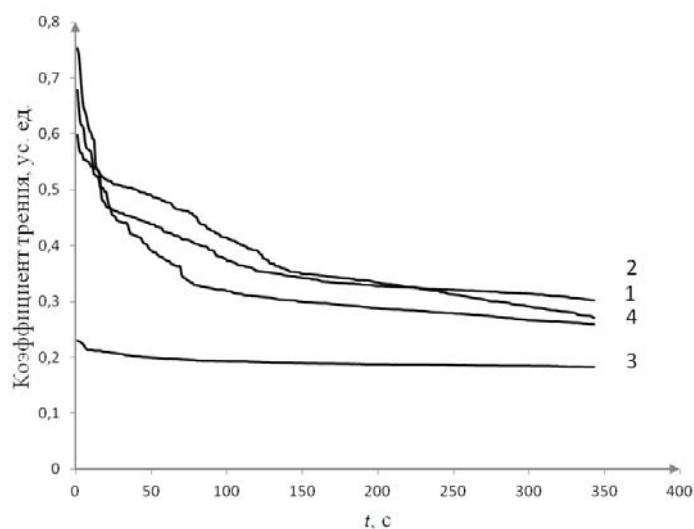


Рис. 3. Зависимость величины коэффициента трения от времени для чистого ПА-6 (2) и полимерных нанокомпозитов, полученных методом экструдирования и содержащих 0,01 вес.% фуллеренов C₆₀ (3); 1 вес.% фуллеренов C₆₀ и 0,05 вес.% Эрукатида (1); 1 вес.% фуллереновой сажи (4)

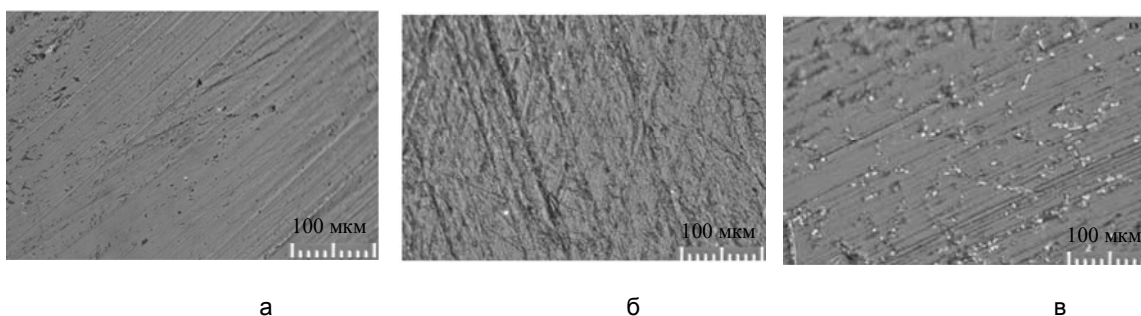


Рис. 4. Фотографии поверхностей трения для чистого ПА-6 (а), ПА-6 с 0,01 вес.% фуллеренов C₆₀ (б) и для ПА-6 с 10 вес.% углеродных волокон (в), полученных методом полимеризации *in situ*. Увеличение 400^х

Легко видеть (рис. 4, а, б), что химически встроенный фуллерен C₆₀ не меняет скользких свойств поверхности по сравнению с чистым ПА-6. В тоже время углеродные волокна вырываются из полимерной матрицы и выступают в качестве задиров, которые ухудшают скользкие свойства поверхности. Подобное действие волокон в полимерных композициях известно [9]. Для нанокомпозитов, полученных методом экструдирования (рис. 3), также наблюдается снижение коэффициента трения, хотя и несколько

меньшее, чем для полимера, синтезированного методом полимеризации *in situ* (при введении 0,01 вес.% фуллерена C_{60} (с $0,30 \pm 0,02$ до $0,25 \pm 0,02$). Самым эффективным оказалось введение 1 вес.% фуллереновой сажи, коэффициент трения снижается при этом до $0,20 \pm 0,01$. Этот эффект, вероятно, обусловлен слоистой структурой сажи, которая действует подобно графиту [3]. Рост коэффициента трения для нанокompозита, наполненного 1 вес.% фуллерена C_{60} в присутствии Эрукатида ($0,33 \pm 0,02$), связан с ростом вязкости композита при трении (при трении происходит разогрев поверхности, и при снижении температуры стеклования, обусловленной присутствием совместителя, полимер быстрее переходит в вязко-текучее состояние). Это подтверждает изучение пятен трения (рис. 5), где для нанокompозита, наполненного 1 вес.% фуллерена C_{60} в присутствии Эрукатида, отчетливо видны подтеки.

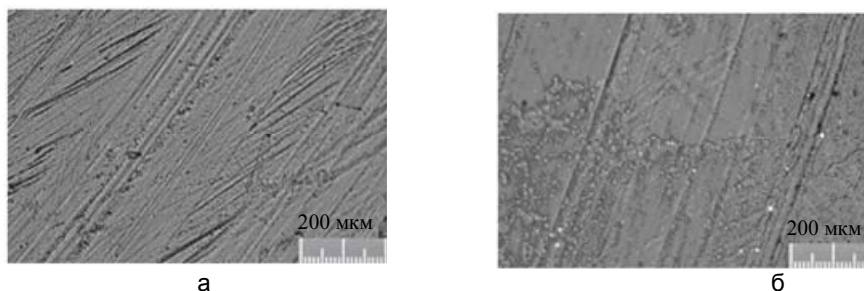


Рис. 5. Фотографии поверхностей трения полимерных нанокompозитов, полученных методом экструдирования и содержащих 0,01 вес.% фуллеренов C_{60} (а); 1 вес.% фуллеренов C_{60} и 0,05 вес.% Эрукатида (б). Увеличение 200*

Заключение

В результате выполненных исследований показана возможность создания полимерных нанокompозитов на основе матриц полиамида 6, модифицированных фуллероидными материалами. Показано, что введение фуллероидных модификаторов значительно (вдвое) снижает коэффициент трения полимерных композитов по сравнению с чистым полиамидом 6. Снижение коэффициента трения полимерных нанокompозитов обусловлено повышением механической прочности композитов при отсутствии выноса агрегатов наночастиц на притираемую поверхность.

Литература

1. Treacy M.M.J., Ebesen T.W., Gibson J.M. Nanoparticles as reinforced agents // *Nature* (London). – 1996. – V. 381. – P. 678–680.
2. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
3. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. – М.: Наука, 2001. – 478 с.
4. Зуев В.В., Иванова Ю.Г. Полимерные нанокompозиты на основе полиамида 6, модифицированного фуллероидными наполнителями // *Высокомолекулярные соединения. Сер. А*. – 2011. – Т. 53. – № 5. – С. 733–738.
5. ОСТ 6-06-С9-93 «КуйбышевАзот». Полиамид гранулированный. – Введ. 01.06.1994. – Куйбышев: ОАО «КуйбышевАзот», 1994. – 25 с.
6. Schaefer D.W., Justice R.S. How nano are nanocomposites // *Macromolecules*. – 2007. – V. 40. – № 24. – P. 8501–8517.
7. Антропова Н.И., Власова К.Н., Самохвалова А.В., Павлова Г.И. Капролон, его получение, свойства и применение. – Л.: Наука, 1966. – 457 с.
8. Липатов Ю.С. Физико-химические основы наполнения полимеров. – М.: Химия, 1991. – 260 с.
9. Bijwe J., Logani C.M., Tewari U.S. Influence of fillers and fiber reinforcement on abrasive wear resistance of some polymeric composites // *Wear*. – 1990. – V. 138. – № 1. – P. 77–92.

Пихуров Дмитрий Витальевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, figus07@rambler.ru
Зуев Вячеслав Викторович – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор химических наук, профессор, zuev@hq.macro.ru

УДК 771.36:663.81

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ТВЕРДЫХ КОМПОНЕНТОВ ПИТЬЕВЫХ СОКОВ ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИХ КАЧЕСТВА

М.Г. Томилин, И.В. Фадеев

Описано применение оптического метода, основанного на использовании нематических жидких кристаллов, для визуализации структур твердых компонентов питьевых соков. Визуализация этих структур проводилась по изменению ориентации граничащего с ними слоя нематического жидкого кристалла. При этом наблюдаются не сами структуры изучаемых осадков, а вызванные ими деформации слоя жидкого кристалла. Полученные изображения этих структур однозначно связаны со свойствами продукта. Объектами исследования были соки прямого отжима и восстановленные, хранившиеся в различных условиях. Проведено их сравнение и показана пригодность метода для контроля качества продукции по анализу структуры ее твердых компонентов.

Ключевые слова: нематический жидкий кристалл, визуализация структуры, питьевые соки, качество продукта, поляризационный микроскоп.

Введение

Исследование свойств растворов является важной проблемой во многих областях человеческой деятельности – химии, биологии, медицине, парфюмерии, пищевой промышленности и пр. Контроль качества жидкостей в пищевой промышленности является сложной задачей, обычно связанной с субъективным анализом. Субъективное восприятие имеет ряд ограничений, относящихся к человеческому фактору, например, к состоянию здоровья и внешним условиям – температуре, влажности и др. С позиций материаловедения – это проблема объективной визуализации структуры источников вкуса. Объективный контроль вкусовых ощущений, на первый взгляд, представляется неразрешимым, если изучать объекты в жидкой или газообразной фазе. Задача существенно упрощается, если объекты находятся в твердой фазе. Объективные методы развиваются по пути использования электронных устройств искусственного носа и языка. Однако все они остаются слепыми, не позволяя визуализировать структуры раздражителей, и плохо развитыми для широкого применения.

Определение свойств раствора во многих случаях можно осуществлять анализом структуры его твердых компонентов (осадка). Авторами предложено исследование структур твердых компонентов растворов методом поляризационно-оптической микроскопии с использованием слоев нематического жидкого кристалла (НЖК). Метод основан на выявлении в поляризованном свете уникальной для каждого объекта структуры с помощью тонкого слоя НЖК, находящегося в контакте с поверхностью изучаемого объекта [1].

Применение тонких слоев НЖК для изучения различных структур и структурных дефектов было описано в работах [1–3]. В частности, в [1, 3] были изучены образцы туалетной воды и духов, образцы различных чаев и вин. Дозированные капли исследуемых растворов помещались на пробные стекла на приборе Affymetrix GMS 417 Analyzer (Genetic MicroSystems) или наносились беличьей кисточкой при комнатной температуре и влажности около 60%. Слой жидкого кристалла (ЖК) толщиной около микрометра наносился на осадок после испарения раствора в эксикаторе или на открытом воздухе при обеспечении защиты от пыли.

В работах [1, 3, 4] показано, что применение НЖК дает новую информацию о структуре осадков растворов, которая может быть использована для выявления фальсифицированных продуктов. Таким образом, применение метода НЖК открывает возможность изучения пищевых продуктов, например, питьевых соков, контроль качества которых актуален.

Целью настоящей работы является изучение структуры осадков различных соков и оценка их качества объективным методом на основе НЖК, а также оценка пригодности метода для контроля качества такой продукции.

Материалы и методы

Объектами исследования явились овощные и фруктовые соки различных типов: неосветленные (с взвесями), осветленные (из которых удалены взвеси до прозрачного состояния), соки прямого отжима (100% соки, полученные непосредственно из фруктов или овощей отжимом, центрифугированием или протиранием), восстановленные (полученные путем восстановления питьевой водой и, возможно, с добавлением сахара, соли, пряностей) [5]. Были изучены образцы, хранившиеся в соответствии с рекомендуемыми условиями (влажность не более 75%, температура 0–25°C, сроки хранения, установленные производителем – не более 12 месяцев), и образцы, хранившиеся с нарушением этих условий – при больших температурах (30–35°C), превышении рекомендуемых сроков хранения не менее чем на 14 дней (для краткости далее – «испорченные соки») [6]. Образцы были получены после испарения дозированных капель растворов на предметных стеклах [7].

В ходе экспериментов капли образцов наносились на стеклянную подложку при температуре около 20°C и влажности примерно 60%, а затем высушивались естественным путем при обеспечении защи-

ты от пыли. Затем проводилось исследование образцов в поляризационном микроскопе, после чего на изучаемую поверхность наносился свободный слой (единицы мкм) НЖК – 4-пентил-4-цианобифенила (5ЦБ) или эвтектической смеси п-метоксибензилиден-п'-бутиланилина и п-этоксбензилиден-п-бутиланилина (МББА:ЭББА), после чего производилось повторное многократное исследование образцов в поляризованном свете (рис. 1) [1, 3].

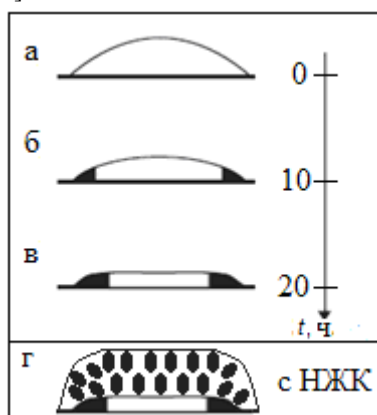


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая изменение профиля капли (вид сбоку) в процессе высыхания (а, б, в) [8] и после нанесения на высохшую каплю тонкого слоя НЖК (г)

Использовался прямой исследовательский металлографический микроскоп отраженного света фирмы Carl Zeiss, модели Axio Imager A1m, позволяющий работать в проходящем и отраженном поляризованном и неполяризованном свете и осуществлять цифровую регистрацию изображений.

Предпосылкой для визуализации различных структур объектов является исходная упорядоченность молекул НЖК. Получение изображения структуры через слой НЖК связано с нарушением его ориентации на неоднородностях структуры (рис. 2). Это нарушение создает изменение фазовой задержки проходящего света из-за большой величины оптической анизотропии НЖК ($\Delta n \approx 0,2$). Если структура образцов различна, то и ориентация молекул жидкого кристалла на их поверхности будет различна. Это можно увидеть в поляризованном свете на просвет или отражение. Подробно теория деформации слоев НЖК в окрестностях дефектов структуры изложена в работах [1, 4].

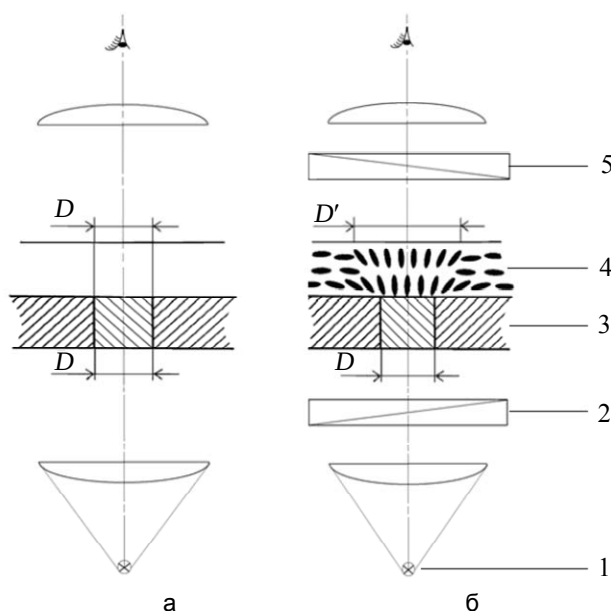


Рис. 2. Принцип метода визуализации изучаемой структуры: без НЖК (а); со слоем НЖК (б) [4].
1 – источник света; 2 – поляризатор; 3 – образец; 4 – слой НЖК; 5 – анализатор

Принцип визуализации структуры осадка с использованием слоя НЖК показан на рис. 2. Если проводить исследование поверхности в неполяризованном свете, то у наблюдателя отсутствует возможность регистрировать фазовую задержку, создаваемую деформированным слоем НЖК, и тогда объект изучается непосредственно сквозь прозрачный слой НЖК. В этом случае не удастся визуализировать структурный дефект D. Если же проводить исследование в поляризованном свете, то наблюдается не сам

структурный дефект D , а вызванные им деформации в слое НЖК – D' . Ввиду малой толщины слоя НЖК размеры D и D' отличаются на малую величину.

Результаты и их обсуждение

В ходе экспериментов были получены изображения осадков различных образцов соков в поляризационный микроскоп без использования и с использованием НЖК.

На рис. 3 схематично показаны области высушенных капель, которые изучались в ходе работы.

На рис. 4 представлены изображения структуры осадков неосветленных томатных соков прямого отжима (рис. 4, а), восстановленного (рис. 4, б), восстановленного «испорченного» сока (рис. 4, в), полученные без использования НЖК.

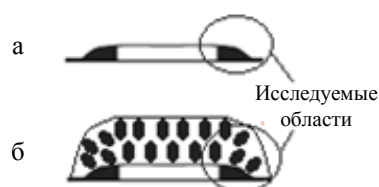


Рис. 3. Профиль высушенной капли (а) и профиль капли, на которую после высыхания был нанесен слой НЖК (б)

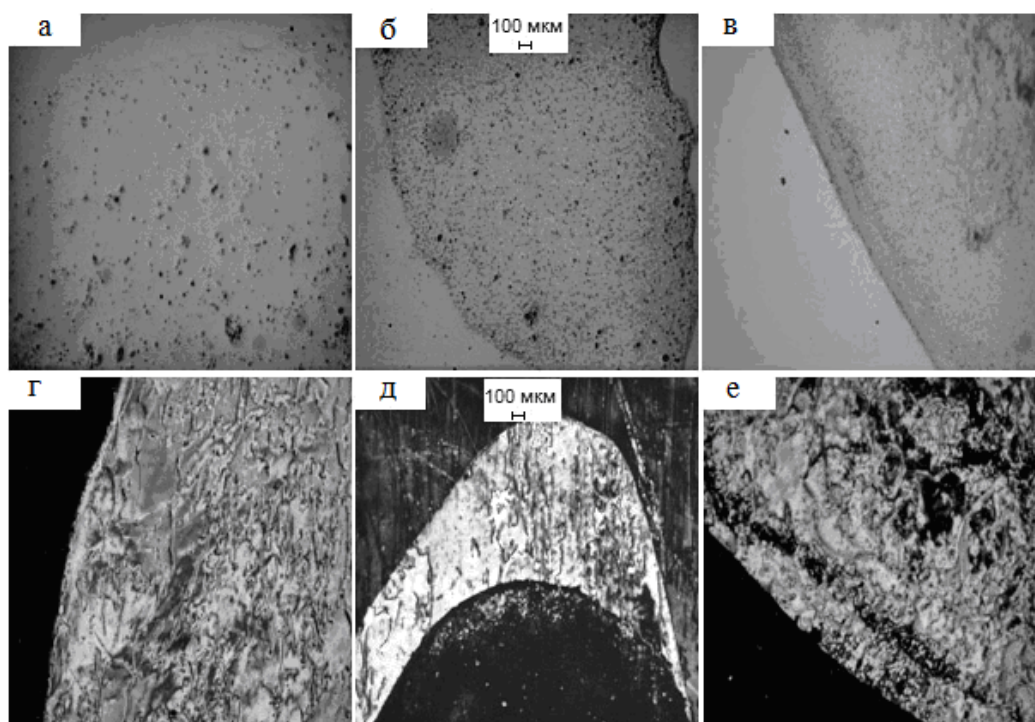


Рис. 4. Изображения структур осадков различных видов неосветленных томатных соков: прямого отжима (а, г), восстановленных (б, д), «испорченных» восстановленных (в, е) полученные без НЖК (а, б, в) и с использованием НЖК (г, д, е). Используемый НЖК – 5ЦБ, $T = 20^\circ\text{C}$. Увеличение $10\times$

Изображения структур образцов, полученные без использования НЖК, визуально невозможно отличить друг от друга – отсутствуют явные различия в структурах осадков разных образцов, ни у одного из образцов не наблюдаются отложения вблизи границ высохшей капли. Мала контрастность полученных изображений. По данным изображениям невозможно идентифицировать образцы – нельзя ни судить о технологии их производства, ни осуществлять контроль качества продукции.

Если нанести на образцы тонкий слой ЖК, то можно получить о них дополнительную информацию (рис. 4, г, д, е). Для образца 4 сока прямого отжима (рис. 4, г) наблюдается структура осадка, одинаковая во всех областях капли, которая представлена наклонной ориентацией молекул ЖК на поверхности. Отсутствуют отложения по окружности высохшей капли.

При исследовании образца 5 (рис. 4, д) картина существенно изменяется. В центре капли преобладает гомеотропная ориентация молекул ЖК, по краям – наклонная. Наблюдается образование кольца отложений по окружности высохшей капли – так называемый «феномен капли кофе». Причиной этого является ряд сложных процессов, объединяемых понятием «дегидратационная самоорганизация» [8, 9].

Необходимым условием для инициации процессов самоорганизации в высыхающей капле является ее прикрепление к субстрату по границе раздела трех фаз (пиннинг), а также наличие в растворе взвешенных частиц [9]. Если в капле растворены какие-либо вещества или имеются взвеси, то в процессе испарения площадь основания капли остается неизменной, краевой угол уменьшается, внутри капли возникает центробежное течение капиллярной природы, которое выносит на край растворенные вещества или взвешенные частицы [7]. В результате этого образуется кольцо отложений по окружности высохшей капли – «феномен капли кофе» (рис. 5) [8, 9]. Было показано [9], что возникновение капиллярных течений, приводящих к выносу веществ на край капли, является универсальным явлением.

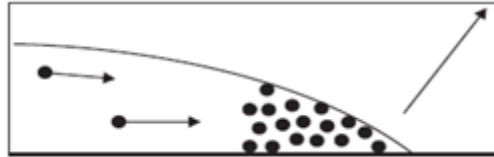


Рис. 5. Схема, иллюстрирующая вынос коллоидных частиц на границу раздела трех фаз центробежным течением [8]

У образца 5 (рис. 4, д) возникновение «феномена капли кофе» можно объяснить наличием в нем взвесей (сок неосветленный), а также добавок, например, соли и сахара (восстановленный) [5]. Из-за наличия взвесей на границу капли выносятся частицы коллоида – области наклонной ориентации ЖК по краям (светло-серая область на рис. 4, д). Структура осадка по краям капли однородна и схожа с той, которая наблюдается у образца 4 по всей площади (рис. 4, г). Примесные частицы (например, соль) остаются в центре капли и на снимке проявляются в виде области гомеотропной ориентации ЖК (черная область на черно-белом изображении – рис. 4, д).

Процессы, вызывающие «эффект капли кофе», изучены лишь приближенно, в основном на базе моделей, учитывающих диффузию компонентов, процессы испарения и вызванные ими капиллярные процессы [10]. Предположительно, отсутствие отложений коллоида по краям у образца 4 вызвано отсутствием примесных компонентов, что, видимо, оказывает влияние на скорость процессов испарения и, как следствие, на капиллярные явления в капле. Наличие примесей также может влиять на диффузию компонентов. По этой причине, несмотря на наличие взвесей, капля распределена однородно по всей площади (в том числе и вблизи границы), что отчетливо видно благодаря использованию НЖК. Данный факт был подтвержден авторами в ходе многочисленных экспериментов, хотя процессы образования отложений коллоида в конкретном случае требуют более детального изучения.

Если образец 5 подвергнуть длительному хранению или нарушить стандартные условия хранения, то однородность структуры исчезнет (рис. 4, е), что можно отчетливо наблюдать, используя НЖК. Также у образца 6 (рис. 4, е) не наблюдается «феномена капли кофе» – области с гомеотропной ориентацией ЖК не сконцентрированы в центре капли, а хаотично распределены по всей площади капли. Возможно, под влиянием ферментов началось спиртовое брожение, которое могло явиться причиной изменения структуры твердых компонентов соков. Может быть, это связано с тем, что жиры и белки (хотя и содержащиеся в очень небольших количествах) вследствие нарушения условий хранения разлагаются с образованием веществ, вызывающих изменения в структуре осадка. Это более отчетливо наблюдается на цветных изображениях.

Предложенный метод визуализации с использованием НЖК позволяет судить об отсутствии, наличии или нарушении «феномена капли кофе», на основании чего можно сделать выводы о наличии в соке примесных компонентов и качестве продукта. По проявлению «феномена капли кофе» также можно судить о наличии коллоидных веществ в растворе, так как данное явление характерно только для растворов со взвесями.

Объектами исследования также стали структуры твердых компонентов других овощных и фруктовых соков. Всего было изучено около 20 образцов соков. При исследовании образцов с большим увеличением стали видны мелкие детали структур, имеющие характерные особенности для каждого образца. Ниже в качестве примеров приведены изображения структур осадков соков овощей (чеснок, картофель – рис. 6, а, б) и фруктов (авокадо, мандарин – рис. 6, в, г).

На изображении структуры чесночного сока наблюдаются ровные, четкие границы, напоминающие растрескавшееся стекло. Структура осадка картофельного сока представляет собой капли сложной конфигурации. Структура твердых компонентов сока мандарина схожа с упорядоченной текстурой мандариновой кожуры. Структура сока авокадо схожа с картофельным соком, но структурные капли в данном случае имеют меньшие размеры. Изображения рассмотренных структур настолько различны, что для их распознавания нет необходимости использовать современные методы оптической обработки изображений.

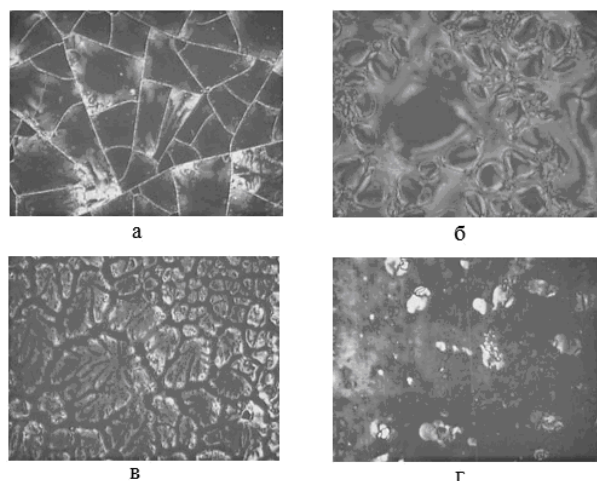


Рис. 6. Изображения структур твердых компонентов различных соков: чеснока (а); картофеля (б); мандарина (в); авокадо (г). Используемый НЖК – МББА:ЭББА, $T = 20^{\circ}\text{C}$. Увеличение $100\times$

Таким образом, метод НЖК дает новую информацию о структурах осадков соков. Различные образцы соков, полученные с использованием разных технологий производства, отличаются структурой, в то время как образцы одинаковых соков, произведенные с использованием одной и той же технологии, имеют схожие структуры, легко идентифицируемые визуально. Структуры твердых компонентов соков, полученных из различных продуктов, также легко различимы. Изученные структуры также отличались по цвету (не отражено на черно-белых изображениях – рис. 4, рис. 6). Цветные изображения структур несут больше информации и улучшают условия анализа образцов по сравнению с черно-белыми изображениями.

Заключение

Предложенный метод наблюдения структуры твердых компонентов растворов и жидкостей в поляризационный микроскоп с использованием тонких слоев нематических жидких кристаллов позволяет получить дополнительную информацию о структуре соков. Становится возможным наблюдение «невидимых» структур образцов, визуализируется распределение компонентов по площади капли, повышается контрастность изображений. Можно судить о технологии их производства и осуществлять объективный контроль качества продукции. В специальных случаях для распознавания изображений структур возможно использование разработанных методов оптической обработки изображений, хотя в общем случае оно не является необходимым, так как различия в структурах осадков соков достаточно очевидны.

Используемый метод представляется новым универсальным инструментом для изучения свойств поверхности и при этом отличается простотой и экспрессностью. Полученные результаты свидетельствуют о высокой чувствительности и пространственном разрешении метода.

Проведенное исследование открывает возможности распространения метода нематических жидких кристаллов на изучение осадков других растворов, используемых в пищевой промышленности, химии, биологии и других областях. На данной стадии метод можно рекомендовать как экспрессный лабораторный метод контроля качества, не требующий специализированного оборудования и контролеров высокой квалификации. Для его более широкого распространения необходимо создание базы данных изображений по структуре различных соков, полученных с использованием описываемого метода.

Литература

1. Томилин М.Г., Невская Г.Е. Фотоника жидких кристаллов. – СПб: Политехника, 2011. – 743 с.
2. Габараев О.Г., Купоросов Ю.И., Томилин М.Г. Применение нематических жидких кристаллов для визуализации структурных дефектов кварцевых резонаторов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 4 (74). – С. 38–43.
3. Tomilin M.G. LC vision in detecting tea structures // Programme and Book of Abstracts «Optics and Laser Applications in Medicine and Environmental Monitoring for Sustainable Development». – University of Cape Coast, Ghana, – 19–24 November, 2007. – P. 81.
4. Томилин М.Г. Взаимодействие жидких кристаллов с поверхностью. – СПб: Политехника, 2001. – 325 с.
5. ГОСТ Р 51398-99. Консервы. Соки, нектары и сокосодержащие напитки. Термины и определения. – Введ. 01.01.2001. – М.: Госстандарт России, 2000. – 5 с.

6. ГОСТ 13799-81. Продукция плодовая, ягодная, овощная и грибная консервированная. Упаковка, маркировка, транспортирование и хранение. – Введ. 01.01.1983. – М.: Стандартиформ, 2007. – 10 с.
7. Тарасевич Ю.Ю., Исакова О.П. и др. Влияние режима испарения на пространственное перераспределение компонентов в испаряющейся капле жидкости на твердой горизонтальной подложке // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80. – № 5. – С. 45–53.
8. Popov Y.O. Evaporative deposition patterns: Spatial dimensions of the deposit // Phys. Rev. E. – 2005. – V. 71. – P. 036313-1–036313-17.
9. Deegan R.D. Pattern formation in drying drops // Phys. Rev. E. – 2000. – V. 61. – № 1. – P. 475–485.
10. Тарасевич Ю.Ю., Православнова Д.М. Качественный анализ закономерностей высыхания капли многокомпонентного раствора на твердой подложке // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77. – № 2. – С. 17–21.

Томилин Максим Георгиевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, mgtomilin@mail.ru

Фадеев Иван Владимирович – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, magic-mbllo@rambler.ru

УДК 68.5.01:658.512.2.011.56

ДВА ПОДХОДА К СТРУКТУРИРОВАНИЮ АЛЬТЕРНАТИВ

Ю.В. Кандырин, Г.Л. Шкурина

Предложены модели формирования частичных порядков альтернатив при условии их линейного упорядочивания по требуемым показателям качества. Рассмотрены методы, основанные на формировании результирующего частичного порядка с помощью графов Бержа и на преобразованиях окрестностей фактор-множеств. Разработка указанных подходов необходима для критериального структурирования вариантов объектов при многокритериальном выборе альтернатив.

Ключевые слова: задачи выбора, оптимальные варианты, линейное и частичное упорядочивание альтернатив, критериальное структурирование объектов.

Введение

При проектировании автоматизированных систем поддержки принятия решений практически важным вопросом является формирование структуры альтернатив, нацеленной на оптимизацию выбора оптимальных в том или ином смысле вариантов.

Использование рационально организованных структур хранения данных в системах автоматизированного выбора позволяет существенно более эффективно решать задачи многокритериального выбора, значительно экономить машинное время на поиск информации, так как процедура выбора в этом случае будет начинаться с оптимальных вариантов. При этом такая вновь создаваемая структура данных должна отражать заложенную лицом, принимающим решение (ЛПР), объективную картину предпочтений, задаваемую частичным или линейным порядком альтернатив [1].

Постановка задачи

Описываемый подход основан на наделении множества возможных вариантов $\Omega = \{\omega_i\}$, $i = \{1, N\}$ структурой, отражающей критериальные требования $\{C\}$. В этом случае решением задачи выбора $\langle C, \Omega \rangle$ будут максимальные элементы множества Ω , частично (или линейно) упорядоченного отношением R_K , задающим предпочтения среди альтернатив. Отношение R_K задается тем или иным критерием выбора, назначаемым ЛПР в качестве целеполагания.

Предлагаемое решение – это, прежде всего, качественно новый подход. Исходное множество альтернатив представляется проектировщику упорядоченным в соответствии с его целевыми устремлениями, которые формально выражены через критериальные постановки. Известно [1], что основные принципы оптимальности подразделяются на два различных класса оптимизационных задач: неметрические и метрические. Основной недостаток неметрических безусловных критериев оптимальности в том, что они не позволяют корректно и точно разрешить проблему устойчивости решений и обладают меньшей силой, по сравнению с метрическими постановками. При этом принцип оптимальности R_{K_i} сильнее R_{K_j} или $R_{K_i} \triangleright R_{K_j}$, если $\Omega_i^0 \subset \Omega_j^0$, где $\Omega_i^0 = R_{K_i}(\Omega)$ и $\Omega_j^0 = R_{K_j}(\Omega)$.

Важнейшую информацию о степени противоречивости целей при выборе из множества возможных альтернатив (МВА) дает вид распределения предпочтительности альтернатив по различным критериальным постановкам. При выборе появляется возможность оперативной оценки потерь при отступлении от оптимальных решений. И еще одним достоинством описываемого подхода является высокая эффективность оптимизационных процедур. Последнее связано с тем, что решение задачи выбора на соответствующем упорядоченном множестве фактически сводится к проверке допустимости решений по условиям и ограничениям только для максимальных элементов [2]. Такие задачи особенно актуальны для создания автоматизированных справочников по элементной базе в единой системе автоматизированного проектирования (САПР), где от задачи к задаче сохраняются устойчивые критериальные и функционально ориентированные постановки задач выбора для компонентов.

Первый подход к решению задачи

Эффективность предложенного подхода можно обеспечить, решив задачи получения необходимых частичных порядков высоких размерностей на основе преобразований базовых линейных или частичных порядков малых размерностей. Структурирование альтернатив отражают целеполагание ЛПР, хотя математические модели структурирования могут быть различными.

Первый подход основан на применении графов Бержа, позволяющих представить частично упорядоченные множества совокупностью линейно упорядоченных множеств, а второй – на формировании результирующих частично упорядоченных множеств с помощью фактор-множеств линейных порядков

вариантов. Основной концептуальный смысл и порядок переструктурирования альтернатив на множестве возможных вариантов (МВА Ω) можно графически интерпретировать (рисунок) как настройку базы данных на конкретную задачу выбора в соответствии с ее пониманием ЛПП.

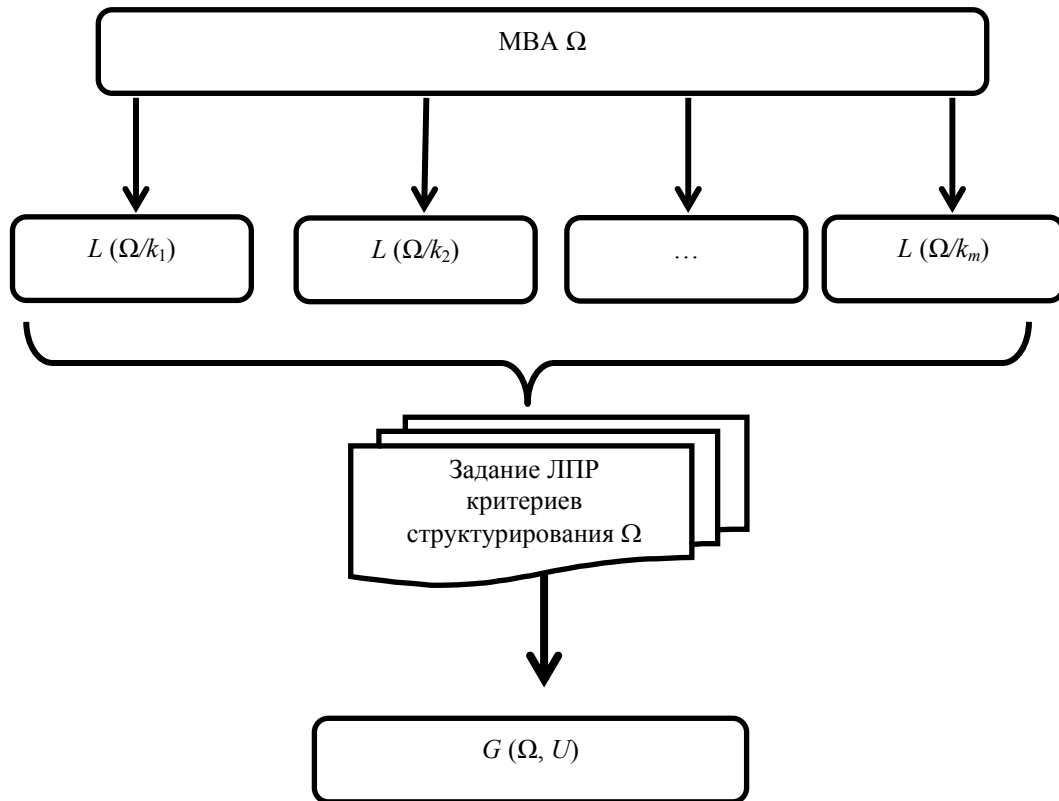


Рисунок. Формирование адаптивного частичного порядка $G(\Omega, U)$ в соответствии с целевой постановкой задачи выбора из линейных порядков альтернатив

Рассмотрим математическую модель представления частично упорядоченного множества совокупностью линейно упорядоченных множеств, которые описываются графами [2].

Пусть частично упорядоченному множеству Ω/R_k соответствует транзитивный граф Бержа $G = \langle \Omega, U_{D1} \rangle$, где $U_{D1} = \{ \langle \omega_i, \omega_j \rangle, \text{если } \omega_i < \omega_j, i \neq j = \{1, N\} \}$.

Обозначим:

- $G = \langle \Omega, U_{D1} \rangle$ – обыкновенный (неориентированный) граф, полученный из $G = \langle \Omega, U_{D1} \rangle$ заменой сигнатуры U_{D2} на U_{D1} при сохранении носителя Ω ; при этом $U_{D2} = \{ \{ \omega_i, \omega_j \}, \text{если } (\omega_i < \omega_j) \vee (\omega_j < \omega_i), i \neq j = \{1, N\} \}$;
- $G = \langle \Omega, U_{D1} \rangle$ – обыкновенный граф, «дополнительный» к $G = \langle \Omega, U_{D2} \rangle$, сигнатура которого U_{D1} является дополнением сигнатуры U_{D2} , т.е. $U_{D2} \cup U_{D1} = \Omega \times \Omega$, а $U_{D2} \cap U_{D1} = \emptyset$;
- $G_A = \langle \Omega, U_A \rangle$, $G_B = \langle \Omega, U_B \rangle$ – графы Бержа – транзитивные турниры, соответствующие линейно упорядоченным множествам Ω/U_A и Ω/U_B ;
- $G_T = \langle \Omega, U_T \rangle$ – граф Бержа, который является транзитацией (транзитивной ориентацией) обыкновенного графа $G = \langle \Omega, U_{D1} \rangle$, если орграф $G_T = \langle \Omega, U_T \rangle$, полученный в результате ориентации всех ребер из U_{D1} графа $G = \langle \Omega, U_{D1} \rangle$, является транзитивным;
- $G_T = \langle \Omega, U_T \rangle$ – противоположная $G_T = \langle \Omega, U_T \rangle$ транзитация графа G , т.е. для $i \neq j = \{1, N\}$ из $\langle \omega_i, \omega_j \rangle \in U_T$ следует $\langle \omega_j, \omega_i \rangle \in U_T$.

Под объединением $\cup$ и пересечением $\cap$ графов $G_i = \langle \Omega_i, U_i \rangle$ и $G_j = \langle \Omega_j, U_j \rangle$ следует понимать операции объединения и пересечения носителей Ω_i, Ω_j и сигнатур U_i, U_j .

Таким образом, показаны не только необходимые и достаточные условия для представления частично упорядоченного множества двумя линейно упорядоченными множествами.

Граф частичного порядка G можно представить в виде пересечения двух графов линейных порядков G_A и G_B тогда и только тогда, когда существует транзитация G_T дополнительного графа G , или, в формализованном виде,

$$G = G_A \cap G_B, \text{ если } \exists G_T \text{ для } G, \quad (1)$$

что является необходимыми и достаточными условиями для представления частично упорядоченного множества двумя линейно упорядоченными множествами.

Если выполнено условие (1), то орграфы линейных порядков G_A и G_B определяются как объединения исходного графа частичного порядка G и противоположных транзитаций графа G :

$$G_A = G \cup G_T; \quad G_B = G \cup G_{\bar{T}}.$$

Из линейных порядков диаграмм Хассе H_A и H_B может быть восстановлен граф частичного порядка более высокой размерности G . Очевидно, что в нем концевые, недоминируемые вершины графа $\{\omega_1, \omega_2\}$ оптимальны по Парето (для минимизации), что является способом нахождения частично упорядоченного множества. Такое представление используется, в частности, для специального кодирования. Последнее дает возможность получить код, позволяющий эффективно находить задачи выбора по концевым вершинам [3].

Второй подход к решению задачи

Следующий подход предполагает использование математических моделей, основанных на описании множеств возможных вариантов с помощью фактор-множеств $\Phi(\Omega/R)$. По определению фактор-множеством называется множество окрестностей единичного радиуса, взятых для всех $\omega_i \in \Omega$, $i = \{1, N\}$. Под окрестностью O_i элемента ω_i будем понимать множество элементов $\{\omega_j\}$, доминирующих или эквивалентных ω_i таких, что они могут быть описаны следующим линейным порядком: $\langle \{\omega_j\}, \omega_i \rangle \in R$ (для min) [3]. Очевидно, что окрестностью минимальных элементов является пустое множество. В самом общем виде это отношение R может задаваться критериями Парето, Слейтера и т.д. [1, 2].

Пусть в качестве правила сравнения вариантов принимается критерий Парето, позволяющий устанавливать частичные порядки с минимумом требуемой начальной информации. Определим окрестность O_i в фактор-множестве по показателю качества k_l как $O_i(\Omega/k_l) \equiv \{\omega_j: k_l(\omega_j) \leq k_l(\omega_i), \omega_j, \omega_i \in \Omega\}$. Тогда фактор-множество Ω/k_l можно представить как совокупность окрестностей $\Phi(\Omega/k_l) = \{O_i(\Omega/k_l)\}$, $i = \{1, |\Omega|\}$, $l = \{1, M\}$.

Рассмотрим пересечение окрестностей $O_i(\Omega/k_1)$ и $O_i(\Omega/k_2)$ для альтернативы ω_i по показателям качества k_1 и k_2 :

$$O_i(\Omega/k_1) \cap O_i(\Omega/k_2) = \{\omega_j: k_1(\omega_j) \leq k_1(\omega_i), \omega_j, \omega_i \in \Omega\} \cap \{\omega_j: k_2(\omega_j) \leq k_2(\omega_i), \omega_j, \omega_i \in \Omega\}.$$

$$\omega_j, \omega_i \in \Omega \} = \{\omega_j: [k_1(\omega_j) \leq k_1(\omega_i)] \cap [k_2(\omega_j) \leq k_2(\omega_i)], \omega_j, \omega_i \in \Omega\}.$$

Продолжая для $l = \{1, M\}$, получаем:

$$\bigcap O_i(\Omega/k_l) = \bigcap \{\omega_j: k_l(\omega_j) \leq k_l(\omega_i), \forall l \in \{1, M\}, \omega_j, \omega_i \in \Omega\}. \quad (2)$$

И, если $\bigcap O_i(\Omega/k_l) = \emptyset$, то ω_i – вариант, не доминируемый любым $\omega_j \in \Omega$. При этом ω_i – оптимальный вариант по принятому критерию Парето.

$$\Omega_\pi \{k_1, \dots, k_M\} = \{\omega_i: \bigcap O_i(\Omega/k_l), \forall l \in \{1, M\}\} = \emptyset\}.$$

Таким образом, решение Ω_π для π -постановки вида $\pi(\Omega/\{k_1, \dots, k_M\})$ определяется пересечением окрестностей фактор-множеств для порядков альтернатив по всем показателям качества из выделенной совокупности $\{k_1, \dots, k_M\}$. Для автоматизации решения задач построения критериально структурированных множеств необходимо, чтобы методы решения задач были тесно увязаны с моделями хранимых данных об альтернативах, важна и компактность хранения информации, и оптимальные пути доступа к ней. Этим требованиям наиболее полно удовлетворяют ассоциативные матрицы (АМ), как показано в таблице.

Альтернативы ω_i	Окрестности $O_i(\omega_i)$			
	$O_1(\omega_i)$	$O_2(\omega_i)$	...	$O_N(\omega_i)$
ω_1	0	B_{12}	...	B_{1N}
ω_2	B_{21}	0	...	B_{2N}
...	...	...	...	...
ω_N	B_{N1}	B_{N2}	...	0

Таблица. Ассоциативная матрица A_i фактор-множества $\Phi(\Omega/k_l)$ линейного порядка $L(\Omega/k_l)$

В строках АМ располагаются альтернативы, а столбцы отображают окрестности. Если альтернатива ω_i доминирует альтернативу ω_k , то элемент ассоциативной матрицы B_{ij} принимает значение «1». Иначе говоря,

$$B_{ij} = \begin{cases} 0, & \omega_j \succ \omega_i, \quad \omega_{j,i} \in L(\Omega/k_l), \quad \omega_j \neq \omega_i \in \Omega, \quad l = \{1, M\}; \\ 0, & i = j; \\ 1, & \omega_j \prec \omega_i, \quad \omega_{j,i} \in L(\Omega/k_l), \quad \omega_j \neq \omega_i \in \Omega, \quad l = \{1, M\}. \end{cases}$$

Естественно, что элементы, стоящие на главной диагонали, всегда принимают значение «0», так как альтернатива не может войти в окрестность самой себе. Если альтернативы ω_i, ω_j несравнимы по данному показателю качества, то элементы B_{ij}, B_{ji} принимают значение «1». В остальных случаях элементы, расположенные симметрично относительно главной диагонали, связаны отношением отрицания $B_{ij} = B_{ji}$. Рассмотрим далее основные свойства фактор-множеств, которые представляются совокупностью АМ.

1. АМ всегда имеют размер $N \times N$, т.е. являются квадратными. Так как в строках матрицы отложены альтернативы, а в столбцах – их окрестности и количество окрестностей всегда совпадает с количеством альтернатив, то число строк равно числу столбцов.
2. Элементы ассоциативной матрицы $A_{l, \min}, B_{ij}, B_{ji}$ равны тогда и только тогда, когда альтернативы ω_i, ω_j несравнимы по k_l .

Перейдем к получению решения задачи выбора оптимальных по π -критерию. Для этого, как следует из выражения (2) необходимо реализовать пересечение фактор-множеств всех назначенных ЛПР показателей качества. Рассмотрим пересечение столбцов C_{l1} и C_{l2} произвольных ассоциативных матриц $A_{l1, \max}, A_{l2, \max}$ фактор множеств

$$C_{l1} \cap C_{l2} = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \dots \\ B_N \end{pmatrix}_{l1} \cap \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \dots \\ B_N \end{pmatrix}_{l2} = \begin{pmatrix} G_1 \\ G_2 \\ \dots \\ G_N \end{pmatrix},$$

где $G_i = (B_i)_{l1} \cap (B_i)_{l2}, i = \{1, N\}$. Очевидно, что результат будет аналогичным для всех столбцов АМ.

Окончательно, для всех АМ $\forall l \in \{1, M\}$ фактор-множеств показателей качества $\Phi (\Omega/k_l)$ получаем выражение, определяющее результирующую ассоциативную матрицу (РАМ) $A_{\text{рез}, 1, 2, \dots, m}$:

$$G_{ij} = B^1_{ij} \cap B^2_{ij} \cap \dots \cap B^M_{ij}, \quad i, j = \{1, N\}. \quad (3)$$

Формализованное выражение (3) назовем π -правилом пересечения ассоциативных матриц фактор-множеств. Основная особенность пересечения по π -правилу – обладание свойством свободной перестановки пересекаемых элементов. Альтернатива ω_i включается во множество нехудших решений, если для столбца, т.е. для окрестности $O_i(\omega_i/\{k_1, \dots, k_M\})$ альтернативы ω_i выполняется условие

$$\bigcup_{j=1}^N G_{i,j} = 0.$$

Заключение

Решение задачи выбора математической модели для критериального априорного структурирования альтернатив дает возможность адаптировать структуры данных к их целевому использованию при решении задач многокритериального выбора. Структурирование вариантов основано на композиции порядков более низкого уровня в частичные порядки более высокого уровня. Само преобразование структур осуществляется в соответствии с рассмотренными выше правилами. Предложенные подходы составляют методику структурирования и выбора рациональных вариантов. Она реализована на практике в программных комплексах: «Выбор 12М», «Choose» и «Ряд», разработанных в Московском энергетическом институте (техническом университете) и внедренных на ряде предприятий и в вузах.

Литература

1. Кандырин Ю.В., Шкурина Г.Л., Сазонова Л.Т. Решение задач многокритериального выбора по последовательно принимаемым SpL-критериям // Концептуальное проектирование в образовании, технике и технологии: Межвуз. сб. науч. тр. – Волгоград: ВолгГТУ, 2000. – С. 96–100.
2. Кандырин Ю.В., Московский А.Е., Шкурина Г.Л. Методика формирования оптимальных очередей ремонтов по техническим характеристикам объектов // Известия ВолгГТУ. Проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. – 2007. – № 2 (28). – С. 95–99.
3. Кандырин Ю.В., Сазонова Л.Т., Шкурина Г.Л. Математические модели структурирования альтернатив для решения задач выбора в САПР // Известия ВолгГТУ. – 2011. – № 3 (76). – С. 111–115.

Кандырин Юрий Владимирович – Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», кандидат технических наук, профессор, ywk@mail.ru
Шкурина Галина Леонидовна – Волгоградский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент, shgl@bk.ru

УДК 658.5

ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВЫПУСКА ТЕКСТОВОЙ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

А.В. Сумцов

На основе обзора существующих программных средств формирования текстовой документации обоснована необходимость создания системы с модульной структурой, которая позволит без реструктуризации расширять свою функциональность и совместимость для решения специфических задач. С учетом сформулированных требований предложены подходы к разработке системы автоматизированного выпуска текстовой документации «Автодок».

Ключевые слова: система автоматизированного выпуска документации, модульная структура, база данных, конструкторская документация, выпуск, формирование, анализ, оптимизация, подход.

Введение

Основным назначением разрабатываемой системы «Автодок» является автоматизация выпуска текстовых документов (ТД). Их внешний вид определяется шаблонами оформления, а содержание формируется на основе информации из базы данных (БД). Под текстовым документом в настоящей работе будем также понимать документ и со смешанным содержимым – текстом и статической графикой, созданной при помощи стороннего программного обеспечения (ПО). Для обоснования необходимости проведения работ по созданию новой системы проведем краткий обзор аналогичных средств выпуска ТД.

Известны системы Catia (разработка компании Dassault Systemes) и Creo Elements (Parametric Technology Corp.). В них номенклатура документации, формируемой автоматизированным путем, ограничивается инженерной спецификацией на изделие [1, 2]. Система автоматизированного проектирования (САПР) NX дополнительно обеспечивает возможность составления ведомостей и перечней покупных изделий [3]. Но в перечисленных пакетах перечень элементов заимствуется из структуры трехмерной модели. Таким образом, выпуск документации на изделие, для которого необходимость наличия модели отсутствует (например, комплекты запасных частей или соединителей), является нерентабельным.

Дополнительный набор функциональности, связанной с выпуском ТД, представляет система T-Flex DOCs – разработка российской компании Топ Системы [4]. Все ее компоненты функционируют на основе единой информационной платформы технического документооборота и ведения состава изделия. Набор шаблонов формируемой документации, характерный ранее рассмотренным системам, дополняется функцией формирования на основе электронной структуры изделия (ЭСИ) различных видов отчетов, технологических карт и ведомостей.

Как показывает проведенный обзор, некоторые из представленных на рынке САПР тесно связывают процесс выпуска документации со структурой модели изделия и не подходят для разработок, которые не требуют трехмерного прототипирования. Другие, в частности, T-Flex DOCs, используют для этих задач ЭСИ и не подходят для условий, когда информация об элементах находится в произвольной БД, не связанной с системой управления жизненным циклом изделия (PLM-системой). Кроме того, рассмотренные САПР не обладают возможностью комплектного формирования документации (комплекты кабельных частей соединителей (КЧС), запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП)), т.е. они не обеспечивают решение специфических задач, характерных для рабочих процессов различных предприятий.

Из изложенного следует вывод о необходимости создания системы с модульной структурой, обладающей возможностью расширения функциональности и области интегрирования. Сформулируем требования к ней более подробно.

Требования к системе

В основу модульной структуры заложены основная программная составляющая (ядро) и динамически подключаемые модули. Обмен данными между конкретным источником (трехмерная модель, ЭСИ или произвольная БД) и системой обеспечивается модулем интеграции. Функциональный модуль решает задачу расширения ее возможностей.

Современные тенденции развития системных сред диктуют требования кроссплатформенной архитектуры проектируемого ПО. Таким образом, система становится более универсальной и позволяет решать специфические задачи, характерные для различных предприятий. Отметим, что функции, выполняемые проектируемой системой «Автодок», не предусматривают формирования конструкторской документации параметрически зависимого (на основе переменных данных) графического содержания – различных видов чертежей, схем и т.п.

Исходя из результатов обзора современных САПР и учитывая выделенные требования, сформулирована цель работы – создать систему выпуска ТД, обладающую следующими особенностями.

1. Модульная структура, позволяющая:

- расширять перечень автоматически формируемых документов, а также добавлять правила генерации их комплектов посредством подключения функциональных модулей, обеспечивающих специфику пользовательского интерфейса для выполняемых задач;

- расширять перечень систем управления данными, с которыми разрабатываемое ПО взаимодействует в части импорта исходной информации. В случае интеграции с различными PLM-системами появляется возможность дополнить цикл выпуска документации этапами, обеспечивающими процесс ее согласования и сдачи в архив.
2. Кроссплатформенная архитектура, обеспечивающая работу ПО в любой системной среде с предустановленной Java Runtime Environment.

Ключевое отличие проектируемой системы «Автодок» от аналогов – ее модульная структура и, как следствие, универсальность, необходимая для решения специфических задач. Объектами автоматизации в проектируемой системе являются процессы формирования комплектов документации на комплекты КЧС и комплекты ЗИП.

Задача, решение которой необходимо для достижения поставленной цели, состоит в поиске наиболее рациональных подходов к проектированию системы автоматизированного выпуска ТД. На этапе формулирования требований к ПО и последующей их реализации является целесообразным построение модели системы. Опишем подходы, позволяющие сформировать наглядное визуальное и, одновременно, детальное ее представление, а также сокращающие затраты на проектирование и построение сложной модели данных.

Построение графической UML-модели и конкретизация функциональных возможностей системы

Последовательная разработка ПО содержит следующие основные этапы: анализ требований к будущей системе, ее реализация, тестирование и развертывание [5–7]. Преимущество такого подхода состоит в простоте процесса проектирования, а недостаток – в отсутствии реверсивности (возможности возврата на ранее пройденные этапы). По этой причине перед разработчиками встает довольно трудоемкая задача по формированию полного перечня требований к системе на начальном этапе ее создания [8], которую на практике удается решить лишь на 80% [9]. Для реализации оставшихся 20% возможностей после выпуска первой версии ПО часто требуется полная переработка приложения с его реструктуризацией. Можно заключить, что последовательный процесс не приемлем для организации проектирования сложных систем с большим количеством элементов и их высокой степенью связности. В связи с этим для разработки ПО автоматизированной системы был выбран подход, использующий графическое описание модели при помощи унифицированного языка моделирования UML (Unified Modeling Language). Визуальным моделированием называется процесс графического представления модели при помощи некоторого стандартного набора элементов. Стандартизация необходима для реализации одного из ключевых преимуществ подхода – гибкости, которую он привносит в процесс разработки. Кроме того, объектно-ориентированная технология имеет итеративный и инкрементальный характер и заключается в периодичном прохождении всех этапов создания системы с ее последовательным уточнением [10, 11].

Взаимодействие пользователя с объектами системы формирует некоторые сценарии работы, для представления которых в нотации UML предназначена диаграмма вариантов использования (use case diagram). Она разрабатывается на этапе анализа и определяет конкретные функциональные возможности будущего ПО.

На рис. 1 представлена диаграмма вариантов использования, являющаяся составной частью графической UML-модели системы «Автодок». «Актеры» – это объекты, взаимодействующие с системой («Разработчик», «Источник данных» и т.п.), варианты использования – сценарии, посредством которых происходят все внутренние и внешние взаимодействия («управлять сундуками», «добавить шаблон» и др.). С помощью специальных видов связей (стрелка с белым треугольником) изображаются правила наследования элементами определенных возможностей. Например, формировать комплекты ЗИП и КЧС могут оба типа пользователей. Сообщить о сбое системы может только разработчик (администратор в этом не испытывает необходимости). В свою очередь, только администратор может добавить или удалить шаблон оформления. Прямоугольный контур графически обозначает функциональный набор системы.

Ввиду ограниченности человеческих возможностей (таких как память, концентрация внимания и т.п.) трудоемкость проектирования пропорциональна сложности систем. Для ее снижения составляется модель. Предложенный подход использует в качестве нотации язык UML, реализующий объектно-ориентированную технологию, которая имеет следующие особенности:

- упрощает процесс поэтапной детализации модели;
- представляет удобные для восприятия диаграммы, упрощающие обмен информацией между участниками проекта;
- мотивирует разработчика определиться с перечнем ее конкретных функциональных возможностей.

Выбор инструмента для работы с языком визуального моделирования относится, скорее, к области личных предпочтений проектировщика.

Графическая модель позволяет формализовать функциональные возможности сколь угодно сложной системы. Однако объем работ по моделированию может быть уменьшен путем оптимизации структуры объектов автоматизации.

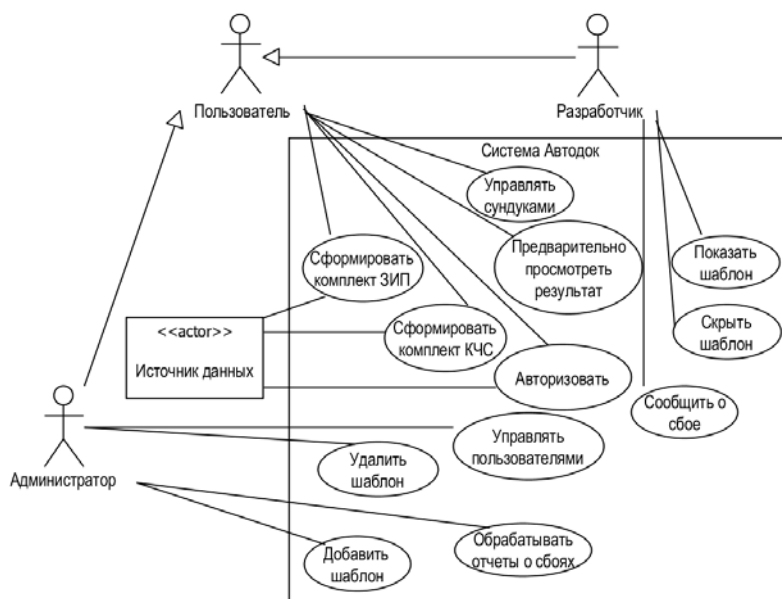


Рис. 1. Диаграмма вариантов использования автоматизированной системы

Анализ и оптимизация структуры комплектов ЗИП и КЧС

Автоматизация процесса выпуска документации предполагает формирование структурированного пакета ТД, вид и состав которых регламентируется международными, государственными стандартами и внутренними руководящими документами предприятий.

До оптимизации в состав электронной структуры комплекта КЧС (рис. 2) (в общем случае, ЭСИ) для каждого соединителя входил свой сборочный чертеж. Поскольку проектируемая система не решает задачи параметрического формирования изображений, ЭСИ была подвергнута анализу, который выявил способ унификации данных о сборочных единицах.

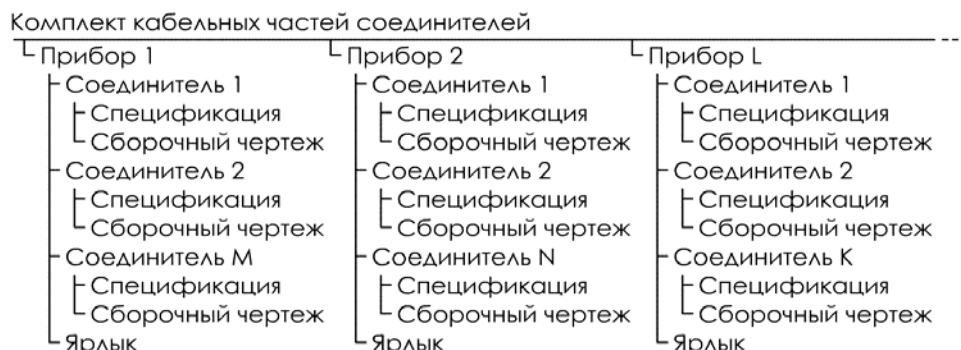


Рис. 2. Фрагмент электронной структуры комплекта конструкторской документации

Выявление конструктивных особенностей и проведение классификации применяемых соединителей позволило описать все сборочные единицы определенного типа соответствующей таблицей комплектования. Это исключило задачу динамического формирования сборочного чертежа, который был заменен типовой инструкцией по сборке и маркировке. Унифицированная ЭСИ (рис. 3) позволяет подготовить необходимые шаблоны и организовать процесс автоматизированного выпуска комплекта документации [12].

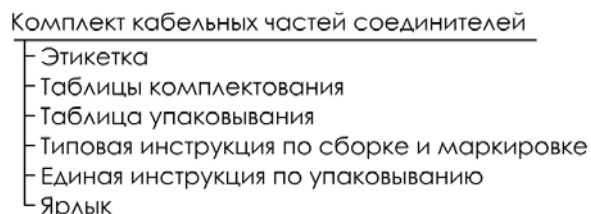


Рис. 3. Унифицированная электронная структура комплекта конструкторской документации

Итак, предложенный подход к проектированию для разрабатываемой системы «Автодок» позволяет не столько оптимизировать, сколько сделать возможным решение задачи автоматизированного выпуска ТД без параметрического формирования чертежей. В общем случае его суть заключается в проведении анализа и последующей унификации ЭСИ, что позволяет существенно сократить затраты на составление алгоритмов и шаблонов представления на этапе проектирования системы, а также на ее расширение в будущем.

Как было сказано ранее, UML-модель обеспечивает разработчика преимуществами итеративного процесса проектирования. Наиболее значимое из них – возможность вносить изменения на любых этапах без существенной реструктуризации разработки. Для снижения затрат на реализацию подобных изменений был разработан и применен подход, который обеспечил простоту масштабируемости модели данных, что позволило абстрагироваться от специфики организации определенной PLM-системы.

Многоуровневая зависимость в сложных наборах данных

Создавая БД для хранения больших объемов сложно организованной информации, на первых этапах невозможно сразу построить ее точную и полную структуру. Вместо этого можно увеличить степень ее универсальности, используя ключевое преимущество реляционной модели данных – возможность применения формального аппарата алгебры отношений и реляционного исчисления для обработки информации [13].

На рис. 4 схематично представлен фрагмент реляционной модели данных для разрабатываемой системы «Автодок». Используются следующие условные обозначения и сокращения: названия первичных ключей выделены подчеркиванием и полужирным начертанием, обязательные поля выделены полужирным начертанием, необязательные поля оформлены регулярным начертанием; ID (Identifier) – идентификатор записи, PK (Primary Key) – первичный ключ, FK (Foreign Key) – внешний ключ. В левой колонке каждого блока указан тип поля (PK или FK).

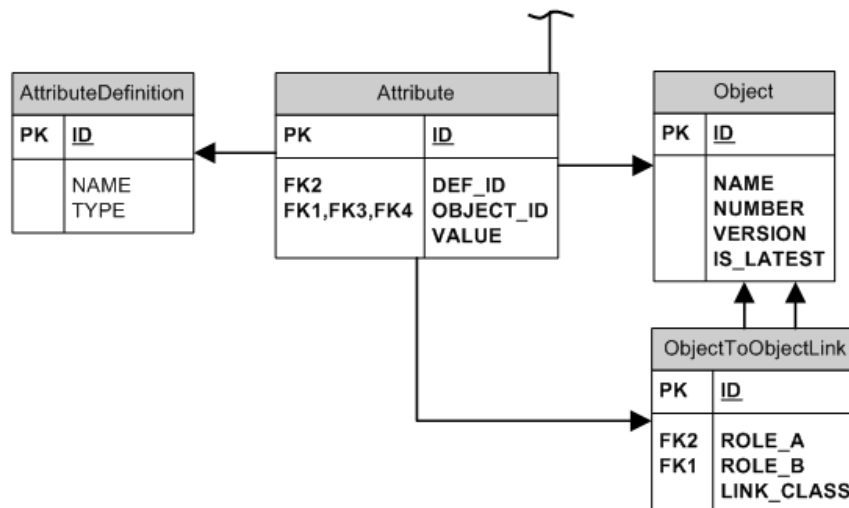


Рис. 4. Фрагмент реляционной модели данных системы

В разрабатываемой системе «Автодок» основной информационной единицей является деталь (соединитель, комплектующая часть для него или принадлежность комплекта ЗИП), характеристика которой содержится в таблице Object. Но в ней указываются лишь общие для всех записей атрибуты (Name, Number, Version, Is_latest), остальные выносятся в отдельные таблицы (Attribute и AttributeDefinition). Сущность подхода состоит в использовании многоуровневой зависимости данных. Таблица Object содержит основной набор свойств, описывающих объект; наборы дополнительных свойств, которые могут отличаться от объекта к объекту, хранятся в отдельной таблице Attribute. В свою очередь, таблица Attribute хранит в себе лишь базовые поля, описывающие конкретное свойство объекта; остальные содержатся в отдельной таблице AttributeDefinition. Таким образом, строится многоуровневая зависимость таблиц, придающая модели данных необходимую гибкость. Обеспечивается возможность изменять объекты, доопределяя их различными специфическими свойствами.

Представленный подход к проектированию сложных наборов данных, использующий многоуровневые зависимости между таблицами, позволяет добиться гибкой спецификации не только самих объектов, но также и их свойств. Его применение для разрабатываемой системы обеспечило простоту процесса масштабирования модели данных, что, в свою очередь, позволило абстрагироваться от специфики организации конкретной PLM-системы.

Заключение

Предложены следующие подходы, апробированные в процессе разработки системы автоматизированного выпуска текстовой документации «Автодок»:

- графическое UML-моделирование, упрощающее процесс проработки модульной архитектуры системы и позволяющее учитывать возникающие на различных этапах ее проектирования требования;
- анализ и оптимизация структуры объектов автоматизации, позволяющие исключить параметрическое формирование чертежей, которое не входит в сферу решаемых системой задач, а также сократить затраты на создание шаблонов оформления;
- многоуровневые зависимости между таблицами, обеспечивающие простоту масштабируемости модели данных системы, и, как следствие, исключающие специфику обмена информацией с конкретной PLM-системой.

Для сокращения затрат на проектирование целесообразно проведение анализа структуры объекта автоматизации и, при необходимости, ее унификация. Сложную структуру и поведение системы, реализация которой требует тщательного планирования и аннотирования, рекомендуется описывать при помощи модели. Использование для этих целей унифицированного языка моделирования UML обеспечивает разработчиков удобствами объектно-ориентированного процесса проектирования. Для обеспечения гибкости модели данных и снижения затрат на расширение функциональности системы могут использоваться многоуровневые зависимости между таблицами. Предложенные подходы позволяют создать надежное программное обеспечение и снизить издержки на его реализацию.

Проект является лауреатом программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса 2010» (проект № У-2010-2/14 «Автоматизация», № 12649).

Литература

1. Орлов Д.А., Крутов В.Н., Треяль В.А., Смирнов А.А. CREO – новое поколение САПР для машиностроения // Инструмент и технологии. – 2011. – № 31. – Вып. 1. – С. 50–54.
2. Басов К.А. CATIA V5. Геометрическое моделирование. – СПб: Питер, 2008. – 272 с.
3. Гончаров П.С., Ельцов М.Ю., Коршиков С.Б., Лаптев И.В., Осюк В.А. NX для конструктора машиностроителя. – М.: ДМК-Пресс, 2010. – 504 с.
4. Бунаков П.Ю. Сквозное проектирование в T-FLEX. – М.: ДМК-Пресс, 2009. – 396 с.
5. Арлоу Д., Нейштадт А. UML 2 и Унифицированный процесс. Практический объектно-ориентированный анализ и проектирование: Пер. с англ. – 2-е изд. – СПб: Символ-Плюс, 2007. – 624 с.
6. Гатчин Ю.А., Крылов Б.А. Концептуальное и инфологическое моделирование проектно-конструкторских задач в интегрированных САПР // Всероссийский научно-технический журнал «Проектирование и технология электронных средств». – Владимир, 2001. – № 4. – С. 32–34.
7. Гатчин Ю.А., Донецкая Ю.В. Разработка методик для автоматизации проектирования изделий приборостроения // Труды конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «AIS-AT'09». – Научное издание в 4-х томах. – М.: Физматлит, 2009. – Т. 3. – С. 145–149.
8. Соммервилл И. Инженерия программного обеспечения: Пер. с англ. – 6-е изд. – М.: Вильямс, 2002. – 624 с.
9. Фаулер М., Скотт К. UML. Основы: Пер. с англ. – СПб: Символ-Плюс, 2002. – 192 с.
10. Боггс У., Боггс М. UML и Rational Rose: Пер. с англ. – М.: Лори, 2004. – 583 с.
11. Кватрани Т. Rational Rose 2000 и UML. Визуальное моделирование: Пер. с англ. – М.: ДМК-Пресс, 2001. – 176 с.
12. Сумцов А.В., Черкас Д.А. Автоматизация процесса разработки комплектов конструкторской документации // Материалы докладов XII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». – СПб: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2010. – 408 с.
13. Teorey T., Lightstone S., Nadeau T. Database Modeling & Design: Logical Design. Fourth Edition. – USA: Elsevier, 2006. – 275 p.

Сумцов Андрей Владимирович – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, felix2k@tut.by

УДК 004.421.2

АВТОМАТИЗАЦИЯ УСТРАНЕНИЯ КЛИНЧЕЙ В ТОПОЛОГИИ ПЕЧАТНОГО МОНТАЖА

С.Ю. Лузин, С.И. Попов, Ю.И. Попов

Предложено решение часто встречающейся проблемы клинчей при автоматической разводке печатных плат. Приведены способы автоматического распознавания различных типов клинчей, алгоритмы их устранения.

Ключевые слова: САПР, автоматическая трассировка, клинчи.

Введение

Применяемые в современных системах автоматизированного проектирования (САПР) методы оптимизации топологии печатного монтажа могут «застревать» в локальных минимумах. Это происходит в тех случаях, когда разводка еще не завершена, но в то же время никакой шаг локальной оптимизации (перекладка одиночного проводника) не может привести к ее улучшению. Пример подобной ситуации – клинч проводников (рис. 1). Клинч не только увеличивает длину проводников, но еще и создает помеху для дальнейшей разводки. Например, при наличии клинча (рис. 1, а) между контактами нельзя провести вертикальную трассу, в то время как при корректной разводке (рис. 1, б) это возможно.

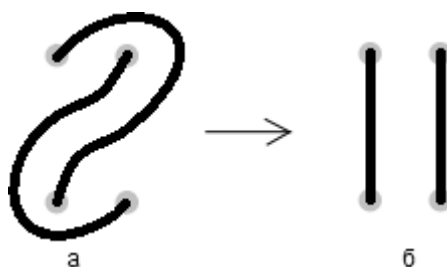


Рис. 1. Пример локального минимума при оптимизации топологии печатного монтажа: клинч (а); желаемая топология (б)

Практически все современные системы автоматической трассировки печатного монтажа при работе создают клинчи в большом количестве, и хотя визуально подобные ситуации определяются легко, устранение их в ручном режиме – весьма трудоемкая задача.

В настоящей работе предложены алгоритмы распознавания и устранения простейших клинчей, однако с некоторыми модификациями их можно использовать и для устранения более сложных топологических ситуаций, таких как многоконтактные и кратные (вложенные многопроводные) клинчи.

Признаки клинчей

Дальнейшее изложение предполагает использование триангулированного пространства печатного монтажа [1, 2].

Для обнаружения клинчей можно использовать следующие признаки:

1. ребро триангуляции, соединяющее пару объектов (например, контактов), пересекает проводник, инцидентный одному из них (дуга $a1$ на рис. 3, а);
2. ребро триангуляции соединяет пару эквипотенциальных объектов, однако ребро пересекают проводники других цепей, а соединяющий их проводник не идет вдоль ребра (дуга $a1$ на рис. 4, а);
3. проводник пересекает ребро триангуляции более одного раза;
4. взаимное огибание: проводник цепи A огибает контакт цепи B , а проводник цепи B огибает контакт цепи A (рис. 5).

Пусть ребру e триангуляции между вершинами $b1$ и $b2$ соответствуют две противоположно направленные дуги (рис. 2): (дуга $a1$ от $b1$ к $b2$ и дуга $a2$ от $b2$ к $b1$).

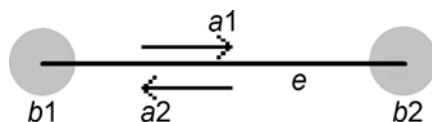


Рис. 2. Соответствие ребру e двух дуг: дуга $a1$ от вершины $b1$ к вершине $b2$ и дуга $a2$ от $b2$ к $b1$

На рис. 3, а, представлен *обычный клинч*, распознаваемый по признаку 1: в нем проложить длинный проводник $w1$ по более короткому пути мешает проводник $w2$. Такой клинч существует, если проводник $w1$, начинающийся с той же вершины $b1$, что и дуга $a1$, пересекает эту дугу, и при этом он не является первым пересекающим ее проводником. На рис. 3, а, до проводника $w1$ дугу $a1$ пересекает про-

проводник w_2 . Вершине триангуляции b_1 не должны быть инцидентны другие проводники (почему – будет объяснено далее при описании алгоритма устранения клинча).

На рис. 4, а, представлен *и-клинч*, распознаваемый по признаку 2: провести проводник w_1 вдоль дуги a_1 мешает пересекающий эту дугу проводник w_2 . Вершинам триангуляции b_1 и b_2 не должны быть инцидентны другие проводники (почему – будет объяснено далее при описании алгоритма устранения клинча).

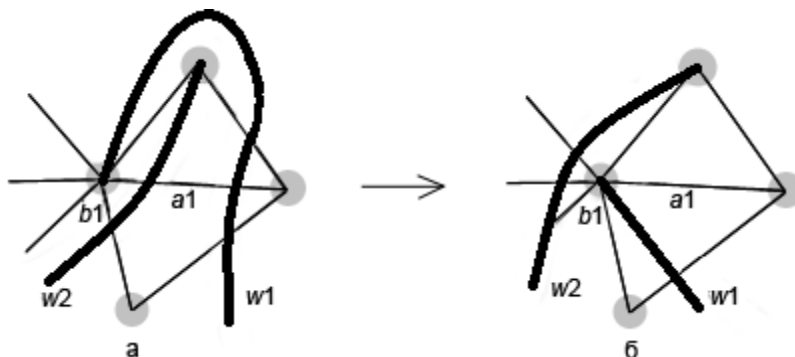


Рис. 3. Обычный клинч: топология до устранения клинча (а); топология после устранения клинча (б).
 w_1 – длинный проводник; w_2 – мешающий проводник; a_1 – дуга, на которой обнаружен клинч;
 b_1 – вершина триангуляции с которой начинается проводник w_1

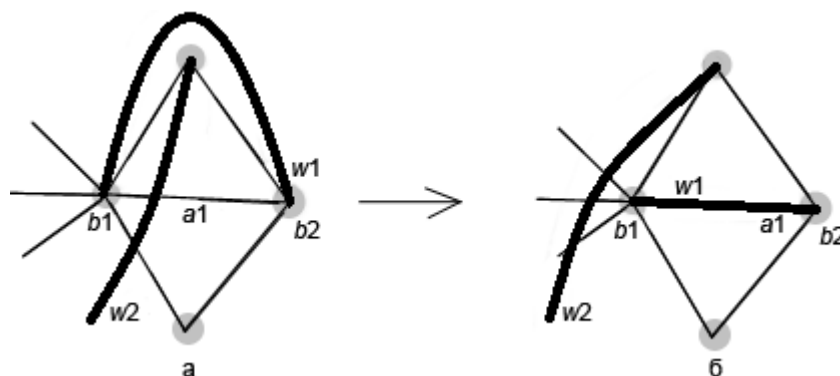


Рис. 4. *и-клинч*: топология до устранения клинча (а); топология после устранения клинча (б).
 w_1 – длинный проводник; w_2 – мешающий проводник; a_1 – дуга, на которой обнаружен клинч;
 b_1, b_2 – вершины, которым инцидентен проводник w_1

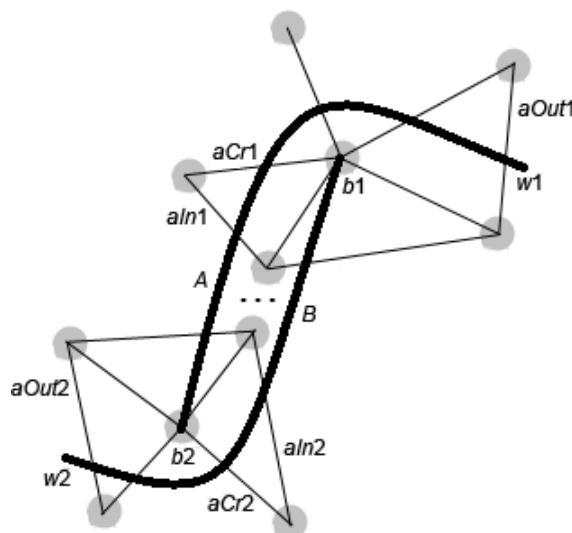


Рис. 5. Неявный клинч: w_1 – длинный проводник; w_2 – мешающий проводник; b_1 – вершина, огибаемая проводником w_1 , с которой начинается проводник w_2 ; b_2 – вершина, которой инцидентен проводник w_1 ; $aCr1, aCr2$ – дуги, исходящие из вершин b_1 и b_2 соответственно, которые пересекают w_1 и w_2 ; $aIn1, aIn2, aOut1, aOut2$ – дуги, через которые w_1 и w_2 входят в окрестности соответствующих вершин и выходят из них

Рассмотрим окрестность вершины триангуляции, состоящую из инцидентных вершине граней. Проведем два вектора: первым соединим вершину триангуляции с точкой входа проводника в окрестность вершины, вторым – эту же вершину триангуляции с точкой выхода проводника из окрестности. Угол между этими двумя векторами назовем углом огибания проводником вершины триангуляции.

На рис. 5 приведен пример *неявного клинча*, распознаваемого по признаку 4: для его обнаружения измеряется угол огибания проводником $w1$ вершины триангуляции $b1$ (от дуги $aIn1$ до дуги $aOut1$). Если такое огибание есть, и огибаемой вершине инцидентен один проводник $w2$, который проходит мимо вершины, с которой начинается $w1$ (пересечение дуги $aCr2$, инцидентной вершине $b2$), то имеет место неявный клинч. По дуге $aCr1$ определяется, что $w1$ проходит мимо $b1$. Между вершинами $b1$ и $b2$ может быть произвольное расстояние, для идентификации клинча главное – ситуация на концах проводников.

Устранение клинчей

Для устранения обычного клинча необходимо:

1. проложить мешающий проводник с другой стороны от инцидентной длинному проводнику вершины триангуляции;
2. присоединить длинный проводник к вершине напрямую (рис. 3, б).

Рассмотрим чуть более сложный случай (рис. 6). Пусть имеется уже не длинный проводник, а длинный путь, состоящий из соединенных точками ветвления проводников ($w5$, $w3$, $w1$ на рис. 6, а).

Для устранения клинча следует:

1. удалить проводник, инцидентный вершине $b1$;
2. соединить вершину $b1$ с проводником $w1$. При этом добавится новое ветвление (и вершина триангуляции, $b2$ на рис. 6, б) и, возможно, новый проводник (в данном случае $w7$).

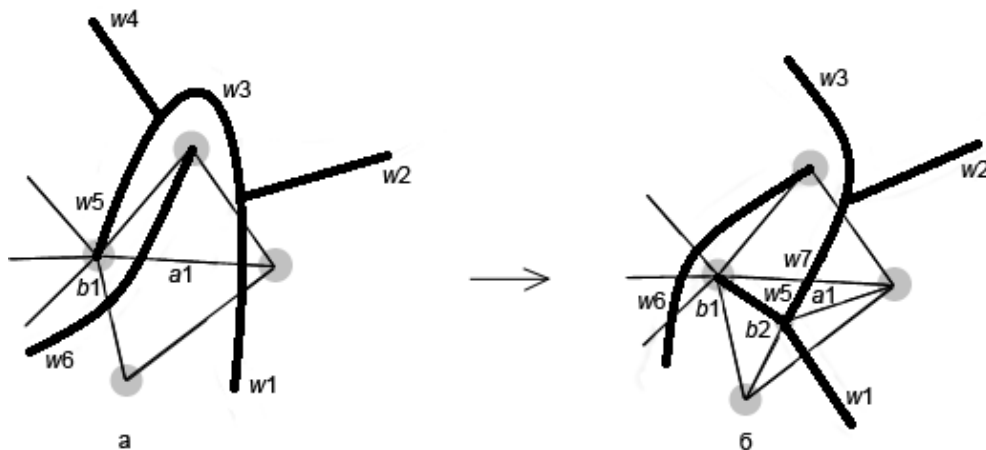


Рис. 6. Устранение обычного клинча: топология до устранения клинча (а); топология после устранения (б).

$a1$ – дуга, на которой обнаружен клинч; $b1$ – вершина, от которой отходит дуга $a1$;
 $w1$, $w3$, $w5$ – проводники, составляющие длинный путь в клинче; $w6$ – мешающий проводник в клинче;
 $w2$, $w4$, $w7$ – проводники; $b2$ – вершина добавленного ветвления

В случае *и-клинча* (рис. 4) необходимо:

1. переложить мешающий проводник с другой стороны от вершины $b1$;
2. длинный проводник $w1$ проложить вдоль дуги, на которой обнаружен клинч.

Если в клинче есть длинный путь, состоящий из нескольких проводников (рис. 7), то вдоль дуги следует переложить первый проводник в длинном пути ($w1$ на рис. 7).

В рассмотренных двух алгоритмах устранения клинчей легко предусмотреть наличие нескольких мешающих проводников. При устранении клинча все мешающие проводники следует переложить по очереди с другой стороны от вершины $b1$.

При обнаружении неявного клинча (рис. 8) следует:

1. проверить, не создается ли большее огибание после устранения клинча. (Для этого используются дуги $aIn2$ и $aOut2$, через которые проводник $w2$ входит в окрестность $b2$ и выходит из нее);
2. удалить проводники в гранях триангуляции, инцидентных вершинам $b1$ и $b2$ (рис. 8, б);
3. поменять принадлежность фрагментов проводников (фрагмент проводника $w1$ становится фрагментом проводника $w2$, и наоборот) между окрестностями вершин $b1$ и $b2$;
4. добавить кратчайшие фрагменты, доставляющие связность проводников (рис. 8, в).

Если вершине $b2$ инцидентно сразу два проводника и если можно найти вершину $b3$ (рис. 9), которой инцидентен только один проводник, клинч также может быть устранен. Для этого следует:

1. переложить мешающий проводник $w2$ с другой стороны от вершины $b3$ и проводника $w3$, соединяющего вершины $b2$ и $b3$;
2. устранить неявный клинч, описанный выше.

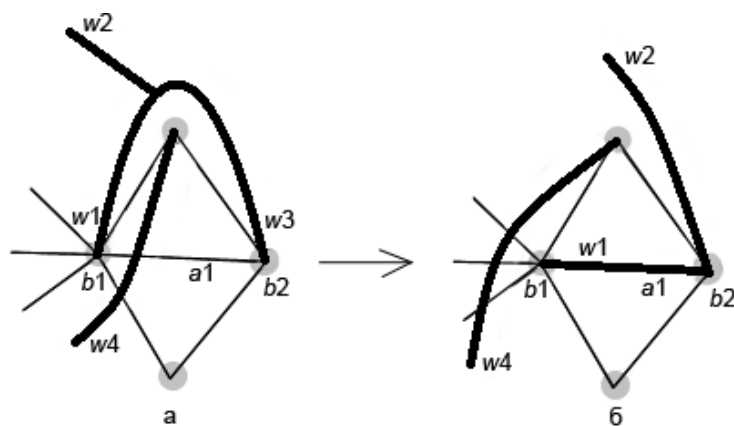


Рис. 7. Устранение u -клинча: топология до устранения клинча (а); топология после устранения (б). $a1$ – дуга, на которой обнаружен клинч; $b1$ – ветвление, от которого отходит дуга $a1$; $w1, w3$ – проводники, составляющие длинный путь в клинче; $w4$ – мешающий проводник в клинче; $w2$ – проводник

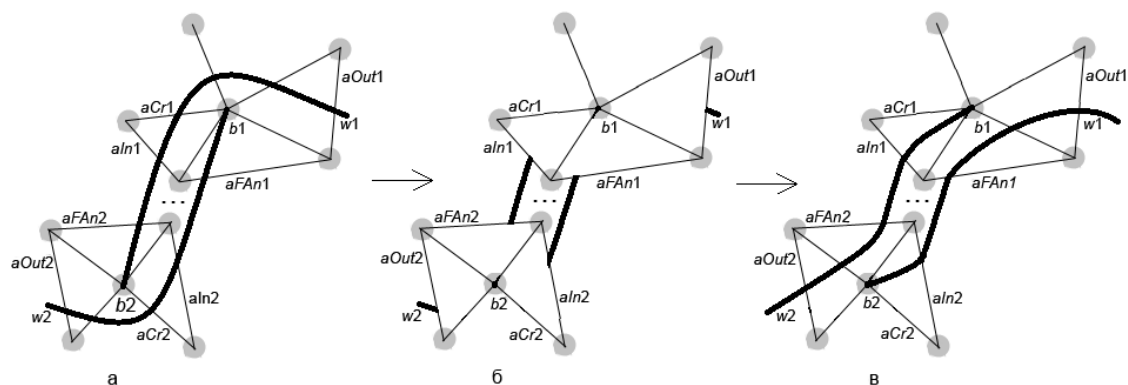


Рис. 8. Устранение неявного клинча: неявный клинч (а); удалены фрагменты проводников с инцидентных вершинам $b1$ и $b2$ дуг (б); клинч устранен (в). $w1$ – длинный проводник; $w2$ – мешающий проводник; $b1$ – вершина, огибаемая проводником $w1$; $b2$ – вершина, которой инцидентен проводник $w1$; $aCr1, aCr2$ – дуги, пересекаемые $w1$ и $w2$; $aln1, aln2, aOut1, aOut2$ – дуги, через которые $w1$ и $w2$ входят в окрестности соответствующих вершин и выходят из них; $aFAn1, aFAn2$ – первые неинцидентные объектам $b1$ и $b2$ дуги, пересекаемые проводниками $w1$ и $w2$

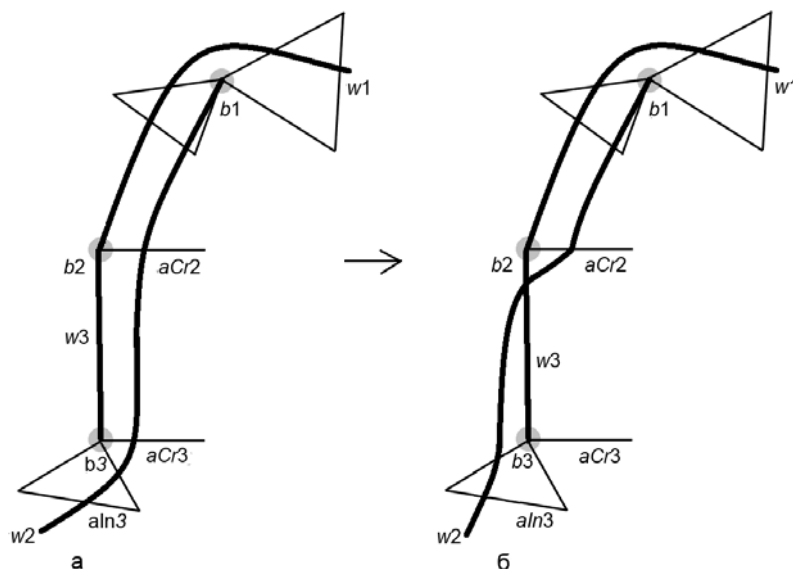


Рис. 9. Первый шаг устранения неявного клинча, длинный путь в котором состоит из последовательности разделенных вершинами проводников: топология до первого шага (а); топология после первого шага (б). $w1$ – длинный проводник; $w2$ – мешающий проводник; $w3$ – второй проводник в длинном пути; $b1$ – вершина, огибаемая проводником $w1$; $b2$ – вершина, с которой начинается проводник $w1$; $b3$ – конечная вершина длинного пути; $aCr2, aCr3$ – дуги, инцидентные вершинам $b2$ и $b3$ соответственно, которые пересекает мешающий проводник $w2$

Во всех вышеприведенных случаях устранения клинчей следует учитывать ширину проводников: при необходимости менять ее на более подходящую и соответственно не устранять клинч при невозможности изменить ширину. Вышеописанные признаки распознавания и способы устранения клинчей используются в отечественной САПР ТороR [3].

Заключение

Описаны способы распознавания и устранения клинчей – топологических ситуаций, часто встречающихся при автоматической трассировке печатного монтажа. Устранение клинчей позволяет высвободить пространство для перекладки проводников, повысить качество топологии, сократить длину проводников.

В текущей версии системы автоматизированного проектирования ТороR устранение клинчей осуществляется после завершения автотрассировки. В дальнейшем планируется обнаруживать и устранять клинчи также и в процессе оптимизации трассировки.

Работа поддержана грантом для студентов, аспирантов вузов и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга 2011 года.

Литература

1. Лузин С.Ю., Лячек Ю.Т., Петросян Г.С., Полубасов О.Б. Модели и алгоритмы автоматизированного проектирования радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры. – СПб: БХВ-Петербург, 2010. – 224 с.
2. Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и ее применение. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2002. – 127 с.
3. Полубасов О.Б. Трассировка в САПР ТороR – взгляд изнутри // Электроника: НТБ. – 2010. – № 6. – С. 104–110.

Лузин Сергей Юрьевич

– ООО «Эремекс», доктор технических наук, технический директор, luzin@eremex.com

Попов Сергей Игоревич

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, sergey.popove@yandex.ru

Попов Юрий Игоревич

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, yurpopov@rambler.ru

УДК 007.51

**ОЦЕНКА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ОБЛАЧНЫХ
ВЫЧИСЛЕНИЯХ НА ОСНОВЕ БАЙЕСОВСКОГО ПОДХОДА**

И.А. Зикратов, С.В. Одегов

Предложен новый подход к анализу и количественной оценке защищенности ресурсов в облачных системах, основанный на использовании особенностей реализации распределенной вычислительной сети. Для повышения степени достоверности оценки в рамках разработанного подхода предложено использование байесовского подхода.

Ключевые слова: информационная безопасность, облачные вычисления, оценка угроз.

Введение

Проблема оценки информационной безопасности (ИБ) стоит в ряду первостепенных задач при проектировании автоматизированных систем (АС). Под информационной безопасностью понимается состояние рассматриваемой системы, при котором она способна противостоять дестабилизирующему воздействию внешних и внутренних информационных элементов самой системы и внешней среды.

В качестве стандартной модели безопасности часто приводят модель из трех категорий [1]:

1. конфиденциальность – состояние информации, при котором доступ к ней осуществляют только субъекты, имеющие на нее право;
2. целостность – избежание несанкционированной модификации информации;
3. доступность – избежание временного или постоянного сокрытия информации от пользователей, получивших права доступа.

В настоящее время существуют различные системы защиты информации (СЗИ) для автоматизированных систем, разработка и применение которых осуществляется в рамках существующей нормативно-правовой базы. Вместе с тем все более широкое распространение находят системы хранения, обработки и передачи данных, основанные на технологии облачных вычислений. Возникает объективное противоречие между необходимостью совершенствования нормативно-правовой базы, регламентирующей разработку средств защиты информации для современных АС, и отсутствием научно-методического аппарата, описывающего подходы к особенностям построения защиты систем, реализующих технологию облачных вычислений. Одной из задач, решаемых разработчиками СЗИ на этапе аудита АС, является задача оценки угроз ИБ. Под угрозой понимается актуализированная опасность информационного воздействия, т.е. событие, которое потенциально может привести к нарушению безопасности информационно-технического объекта. На основе модели угроз, оценки уязвимостей АС определяются требования к СЗИ, обеспечивающей требуемый уровень защищенности информации. В настоящей работе предложен подход для решения этой задачи, заключающийся в использовании особенностей реализации облачных технологий и применении байесовского подхода для количественной оценки степени защищенности ресурсов распределенной сети.

Понятие облачных вычислений

Облачные технологии являются одним из этапов развития технологии распределенных вычислений и виртуализации сетевых ресурсов. Существуют разнообразные определения того, что называется облачными вычислениями. Облачные вычисления – модель обеспечения сетевого доступа к общему пулу конфигурируемых вычислительных ресурсов, которые могут быть оперативно представлены и освоены с минимальными эксплуатационными затратами [2]. Применение облачных технологий возрастает с каждым годом. Так, к 2013 г. ожидается увеличение капиталовложений в облачные сервисы до 150 млрд долларов [3], что приведет к прогнозируемому увеличению доли таких технологий на рынке поставщиков услуг АС.

Рис. 1 иллюстрирует различия в сфере охвата и контроля между подписчиком и поставщиком услуг для каждой из моделей. Из рис. 1 видно, что сферы управления и контроля различны для каждой сервисной модели облачных вычислений.

Облачный сервис состоит из пяти слоев. Два нижних слоя – это физические элементы облачной среды, которые находятся под полным контролем поставщика услуг, независимо от сервисной модели. Остальные слои содержат логические элементы облачной среды. Инфраструктура для виртуализации включает в себя гипервизоры, представляющие собой операционную систему, например, VMware ESX, виртуальные машины, хранилища данных. На уровне платформы содержатся библиотеки и утилиты. Уровень приложений содержит программные приложения для конечных пользователей [4].

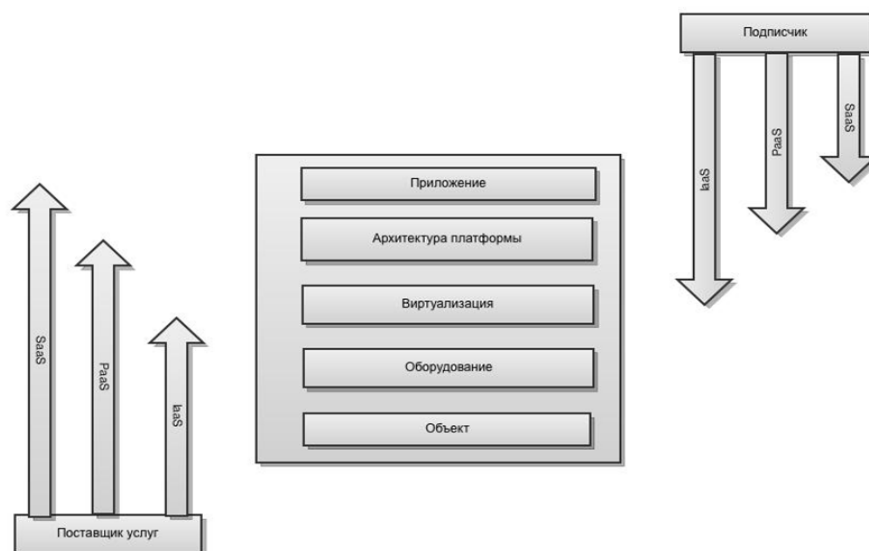


Рис. 1. Архитектура взаимодействия в облачных вычислениях

Таким образом, технология облачных вычислений позволяет утверждать, что ИБ требуется рассматривать с двух точек зрения – поставщика услуг и пользователей обычных ресурсов. С точки зрения поставщика услуг необходимо уяснить и выполнить требования заказчика по безопасности информации в плане обеспечения ее конфиденциальности, целостности и доступности. Реализация этой задачи позволит поставщику определить, какие ресурсы «облака» можно будет использовать в интересах конкретного заказчика, и оценить требования к СЗИ на этих ресурсах. Очевидно, что, так как заказчики могут предъявлять различные требования к моделям безопасности, то для поставщика услуг экономически целесообразно иметь в «облаке» ресурсы с различной степенью защищенности. Например, для регулирования взаимоотношений между поставщиком услуг и пользователем в зарубежных странах применяется соглашение об уровне обслуживания SLA (Service Level Agreement).

Современные угрозы облачным вычислениям

В настоящее время наибольшее распространение получили следующие угрозы облачным вычислениям [5]: злоупотребление доступом и нарушение правил использования сети; инсайдеры; уязвимости технологии облачных вычислений.

Контроль за формированием и динамическим изменением угроз является одним из определяющих факторов для выявления угроз ИБ. Схема, представленная на рис. 2, позволяет оценить качественную картину угроз распределенным системам [5].

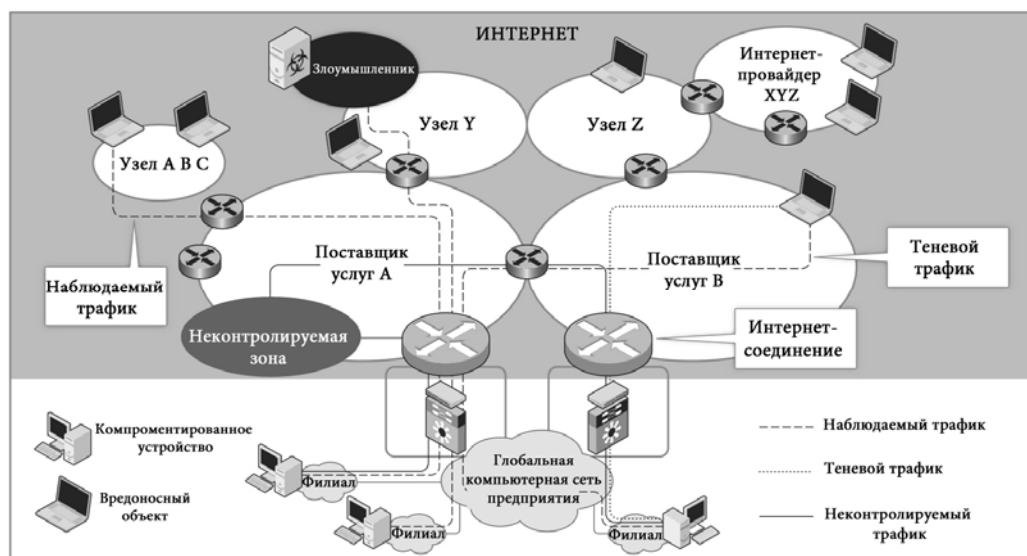


Рис. 2. Схема угроз облачным вычислениям

Из рис. 2 видно, что злоумышленник, используя скомпрометированные компьютеры сети, может получить несанкционированный доступ к вычислительным и конфиденциальным ресурсам облачной сети. Аналогично, инсайдеры могут получить доступ к конфиденциальным данным пользователя, обрабатываемым в облачной сети. Для количественной оценки уязвимости используют различные методики.

Методика оценки угроз ИБ при использовании облачных вычислений

Из литературы известны различные методики для оценки угроз информации и уязвимостей АС, используемые для локальных вычислительных систем (ЛВС). К наиболее известным из них относятся [1, 6, 7]:

- методика экспертного оценивания системы безопасности информации;
- методика многокритериальной оценки;
- модель СЗИ с полным перекрытием;
- методика на основе базового показателя уязвимости;
- другие методики.

Недостатком существующих методик является сложность применения к современным каналам несанкционированной передачи информации (КНПИ) для распределенных систем. Это обусловлено следующими факторами:

- КНПИ различны для каждой реализации технологии облачных вычислений;
- понятие «контролируемой зоны» становится неактуальным;
- отсутствует возможность получения каких-либо количественных экспертных оценок о вероятности реализации угроз ввиду незнания географии, условий функционирования и степени защищенности ресурсов.

Кроме того, относительная редкость возникновения события в ЛВС – реализация i -й угрозы по j -му КНПИ – приводит к трудностям при попытке использования статистических методов оценки вероятности угрозы.

В то же время, как следует из рис. 2, основной особенностью облачных сетей является «распределенность» ресурсов. Это означает наличие в «облаке» относительно большого числа разнотипных узлов, что предоставляет возможность создания механизма для статистического «накопления» знаний об угрозах, уязвимостях и успешности их устранения путем сопоставления оценки уязвимости k -го узла сети n -го типа с аналогичными ресурсами сети при воздействии по нему i -й угрозы по j -му КНПИ. Реализация такого механизма позволит осуществлять динамическое уточнение модели угроз в процессе эксплуатации АС и адаптивного управления СЗИ.

Методологической основой описанного подхода для оценки угроз облачных вычислений могут служить так называемые интеллектуальные методы анализа данных. Наиболее распространенным из них является байесовский подход, который предоставляет ряд преимуществ:

- возможность получения апостериорной оценки вероятности инцидента;
- возможность отслеживания поступления новых данных;
- выявление зависимости между факторами, влияющими на ИБ;
- логическое объяснение своих выводов, физическая интерпретация и изменение структуры отношений между значениями задачи.

В основе байесовских сетей лежит теорема Байеса. Теорема Байеса – основная теорема элементарной теории вероятности, которая позволяет определить вероятность того, что произошло какое-либо событие при наличии статистических данных.

Привлекательность байесовского подхода состоит в том, что имеющаяся в распоряжении экспертов информация может не отвечать требованиям представительности статистической выборки, что делает использование многих традиционных частотных подходов неправомерным. Более того, ситуация, в которой принимается решение в сфере ИБ, может быть вообще новой и никогда ранее не анализируемой. Эти особенности усложняют процесс принятия решений и могут поставить под сомнение какие-либо выводы и заключения. В этом случае байесовский подход может оказаться весьма полезным и эффективным для количественной оценки факторов.

Пример оценки угроз ИБ при использовании облачных вычислений

Рассмотрим тривиальный пример. На рис. 3 представлен фрагмент распределенной вычислительной системы, в составе которой имеются ресурсы различного уровня (класса) защищенности – «уровень А», «уровень В» и «уровень С», в зависимости от СЗИ, реализованной на данном ресурсе.

Предположим, что необходимо определить степень защищенности ресурсов исследуемой информационной «облачной» системы от некоторой угрозы Y :

- 1-я группа («уровень А») – защищенные системы;
- 2-я группа («уровень В») – системы с высокой степенью защищенности;

– 3-я группа («уровень С») – системы с низкой степенью защищенности.

Таким образом, при анализе конкретного ресурса имеются три гипотезы θ_i ее принадлежности n -й группе, $n = 1, 2, 3$. Пусть из общей статистики воздействия угроз вида Y на узлы «облака» известно, что 50% таких узлов оказались защищенными, 30% узлов имеют высокую и 20% – низкую защищенность. Используя эти данные, можно определить априорные вероятности гипотез $P(\theta_1) = 0,5$; $P(\theta_2) = 0,3$; $P(\theta_3) = 0,2$.

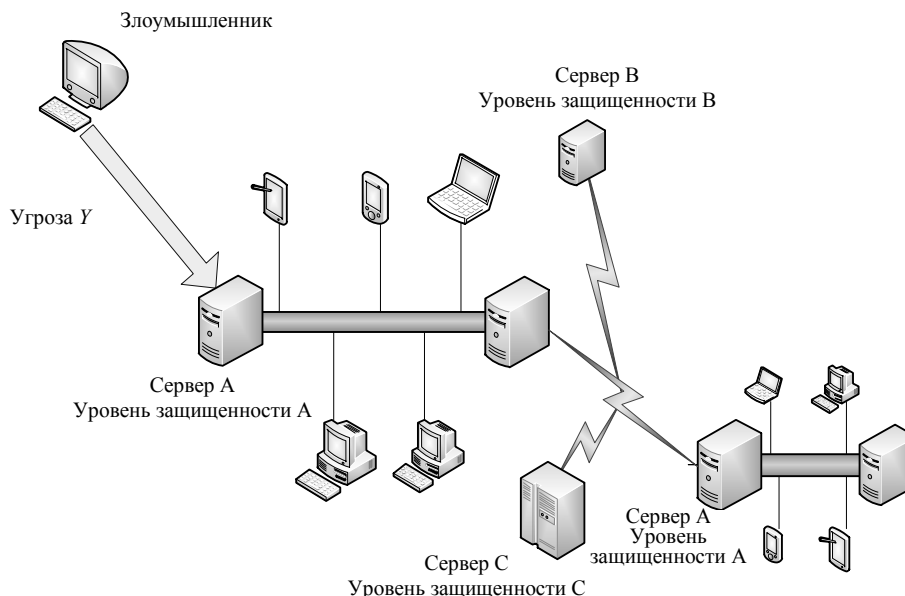


Рис. 3. Фрагмент распределенной вычислительной сети

Очевидно, что признаками защищенности ресурсов в «облаке» могут служить различные показатели, анализ и разработка которых выходит за рамки данной работы.

Для иллюстрации использования байесовского подхода в рассматриваемом примере из всего кортежа возможных показателей защищенности системы защиты выберем три: способность СЗИ обеспечить конфиденциальность информации при воздействии угрозы Y (y_1), способность СЗИ обеспечить целостность информации (y_2) и способность СЗИ обеспечить доступность информации (y_3). Допустим, что из анализа угроз такого типа известно, что при воздействии на ресурсы 1-й группы конфиденциальность обеспечивалась в 60% случаев, при воздействии на ресурсы 2-й группы – в 80% случаев, на ресурсы 3-й группы – в 15% случаев. Отсюда можно записать условные вероятности $P(y_1 / \theta_1) = 0,6$; $P(y_1 / \theta_2) = 0,8$ и $P(y_1 / \theta_3) = 0,15$. Также известно, что при воздействии угрозы Y имеющиеся СЗИ узлов 1-й группы позволили обеспечить целостность информации в 70% случаев. Для СЗИ 2-й и 3-й группы защищенности такие показатели равны соответственно 90% и 2%. Тогда можно записать условные вероятности $P(y_2 / \theta_1) = 0,7$, $P(y_2 / \theta_2) = 0,9$ и $P(y_2 / \theta_3) = 0,02$.

По аналогии примем показатели защищенности узлов 1, 2 и 3-й групп при воздействии угрозы Y в отношении модели доступности:

$$P(y_3 / \theta_1) = 0,8, \quad P(y_3 / \theta_2) = 0,9 \quad \text{и} \quad P(y_3 / \theta_3) = 0,5.$$

Предположим, что достоверно выявлено воздействие угрозы рассматриваемого типа на исследуемый или аналогичный ресурс, оснащенный одинаковыми СЗИ. При этом нарушения конфиденциальности информации, хранимой на атакованном ресурсе, не произошло. Учитывая показатель y_1 , вычислим апостериорные вероятности гипотез для одного свидетельства:

$$P(\theta_1 / y_1) = \frac{P(y_1 / \theta_1)P(\theta_1)}{\sum_{i=1}^3 P(y_1 / \theta_i)P(\theta_i)} = 0,53,$$

$$P(\theta_2 / y_1) = \frac{P(y_1 / \theta_2)P(\theta_2)}{\sum_{i=1}^3 P(y_1 / \theta_i)P(\theta_i)} = 0,42,$$

$$P(\theta_3 / y_1) = \frac{P(y_1 / \theta_3)P(\theta_3)}{\sum_{i=1}^3 P(y_1 / \theta_i)P(\theta_i)} = 0,05.$$

Из результатов расчета следует, что после того, как y_1 произошло, доверие к гипотезам θ_1 и θ_2 возросло, а к гипотезе θ_3 – снизилось.

Очевидно, что если в результате опыта выяснилось, что СЗИ не обеспечила конфиденциальность информации при воздействии угрозы, то необходимо рассматривать противоположные события $P(\bar{y}_1 / \theta_i) = 1 - P(y_1 / \theta_i)$. Тогда получим $P(\theta_1 / \bar{y}_1) = 0,47$, $P(\theta_2 / \bar{y}_1) = 0,14$ и $P(\theta_3 / \bar{y}_1) = 0,40$. Таким образом, доверие к гипотезе о низкой защищенности исследуемого ресурса существенно возрастает, а доверие к гипотезе о высокой степени надежности резко уменьшается.

В процессе сбора фактов вероятности гипотез будут повышаться, если факты поддерживают их, или уменьшаться, если факты опровергают их. Если одновременно получены два показателя y_1 и y_2 , т.е. установлено, что обеспечены конфиденциальность и целостность, то при условии их независимости можно воспользоваться формулой

$$P(\theta_i / y_1, y_2) = \frac{P(y_1 / \theta_i)P(y_2 / \theta_i)P(\theta_i)}{\sum_{i=1}^3 P(y_1 / \theta_i)P(y_2 / \theta_i)P(\theta_i)}.$$

Вероятности гипотез в этом случае будут равны $P(\theta_1 / y_1, y_2) = 0,49$; $P(\theta_2 / y_1, y_2) = 0,51$; $P(\theta_3 / y_1, y_2) = 0$.

По сравнению с результатами, полученными по одному показателю y_1 , доверие к первой и третьей гипотезе снизилось, а ко второй – возросло. Исходя из этого, с вероятностью 0,51 исследуемый узел можно отнести к группе ресурсов с высокой степенью защищенности по отношению к воздействию угрозы типа Y . При получении показателя y_3 расчеты проводятся аналогично.

Осуществив подобные расчеты для всех угроз безопасности в соответствии с моделью угроз и зная требования заказчика по обеспечению моделей безопасности, можно принимать обоснованные решения на предоставление ресурсов той или иной степени защищенности, а также, при необходимости, конфигурировать СЗИ для ресурсов различных групп.

Таким образом, приведенный пример, не претендуя на глубокий анализ байесовского подхода, иллюстрирует его практическую применимость в задачах построения СЗИ и управления информационной безопасностью в распределенных вычислительных сетях.

Заключение

Широкое распространение облачных вычислений на рынке поставщиков ИТ-услуг приводит к необходимости совершенствования научно-методического аппарата для построения систем защиты информации. Предлагаемый подход позволяет на основе модели угроз, требований заказчика к обеспечению конфиденциальности, целостности и доступности информации осуществлять количественную вероятностную оценку защищенности ресурсов при использовании облачных вычислений.

Особенностью подхода, предлагаемого авторами, является использование не только априорных, но и апостериорных оценок защищенности ресурсов облачной сети на основе анализа функционирования узлов с различными системами защиты информации и байесовского решающего правила. Это позволит принимать обоснованные решения по предоставлению услуг на обработку информации различной степени конфиденциальности.

Работа выполнена по ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007–2013 годы» в рамках государственного контракта № 07.524.12.4009 на выполнение опытно-конструкторских работ.

Литература

1. Малюк А.А. Информационная безопасность: Концептуальные и методологические основы защиты информации. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 282 с.
2. Jansen W., Grance T. Guidelines on Security and Privacy in Public Cloud Computing. Draft NIST Special Publication 800-144. – Gaithersburg, 2011. – 52 p.
3. CNews Analytics (CNA). Влияние кризиса на рынок ИТ-услуг [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cfin.ru/anticrisis/companies/branch/it.shtml>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 25.02.2012).
4. Catteddu D., Hogben G. Cloud Computing: Benefits, risks and recommendations for information security. – Heraklion: ENISA, 2009. – 125 p.
5. Macaulay T. Upstream Intelligence Use Cases // IANewsletter. – 2011. – V. 14. – P. 18–22.

6. Домарев В.В. Безопасность информационных технологий. Методология создания систем защиты. – Киев: ТИД «ДС», 2008. – 688 с.
7. Герасименко В.А., Малюк А.А. Основы защиты информации. – М.: МИФИ, 1997. – 537 с.

- Зикратов Игорь Алексеевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой, zikratov@cit.ifmo.ru
- Одегов Степан Викторович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, odegov.sv@gmail.com

УДК 004.056

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ЗАЩИЩЕННОСТИ АРХИТЕКТУР ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

А.В. Гвоздев, И.А. Зикратов, И.С. Лебедев, С.В. Лапшин, И.Н. Соловьев

Предложена методика оценки защищенности архитектур программного обеспечения. Подход позволяет производить сравнительный анализ защищенности программного обеспечения сложных аппаратно-программных комплексов с целью обоснования и выбора их архитектур на ранних этапах жизненного цикла и выявлять наиболее уязвимые программные модули.

Ключевые слова: защищенность архитектур программного обеспечения, выбор архитектуры программного обеспечения, оценка уязвимости.

Введение

Повышение эксплуатационных характеристик программного обеспечения (ПО) подразумевает обеспечение заданных показателей защищенности аппаратной и программной частей. Для оценки защищенности программ используют различные модели, которые разделяют на аналитические и эмпирические [1]. Аналитические модели дают возможность рассчитать количественные показатели защищенности, основываясь на полученных данных о поведении программы в процессе тестирования, эмпирические – базируются на анализе структурных особенностей программных комплексов.

Для предварительной оценки вновь разрабатываемого ПО, анализа компонентного взаимодействия и эмерджентных свойств применяются прогнозные модели, относящиеся к классу эмпирических. Они основаны на измерении технических характеристик создаваемой программы: длина, сложность, число циклов и степень их вложенности, количество ошибок на страницу операторов программы и др. [2]. Учитывая уникальность большинства разработок, их сложность, отсутствие открытой информации по имеющимся аналогам, использование таких данных может быть весьма трудоемким и продолжительным по времени процессом. Зачастую разработчикам ПО требуется на ранних этапах жизненного цикла иметь обоснованное решение об использовании той или иной архитектуры, базирующееся на количественных оценках показателей надежности.

Предлагаемая методика предназначена для получения таких оценок, она дает возможность обосновать структурную схему изделия с точки зрения обеспечения лучших, по сравнению с альтернативными решениями, показателей защищенности, а также выявить наиболее уязвимые программные модули, требующие особого внимания. Важно отметить, что рассматриваемые методы оценки применимы не ко всем типам уязвимостей. Например, они могут быть использованы для оценки защищенности от атак типа «отказ в обслуживании», в то время как оценить, таким образом, защищенность от атак типа «повышение привилегий» практически невозможно.

Методика оценки

Большинство подходов к оценке защищенности ПО базируется на наличии определенного набора средств и механизмов защиты, позволяющих отнести систему к одному из уровней защищенности, определенному руководящими документами и стандартами. Однако на сегодняшний день все большее значение приобретают количественные оценки, позволяющие производить сравнение и выбор элементов систем. Особенность подхода состоит в том, чтобы рассмотреть влияние программных ошибок на работу с помощью вероятностных показателей, например «вероятности защищенности», на основе которой построить зависимость защищенности функционирования отдельных модулей.

Предлагаемая методика прогнозной оценки защищенности архитектур ПО отличается от известных, основанных на учете качественного состава механизмов и средств защиты, использованием аппарата теории надежности, что позволяет вычислить прогнозные вероятностные количественные показатели защищенности и определить требуемый состав и конфигурацию на ранних этапах проектирования системы. Рассматриваемая методика состоит из следующих шагов:

1. создание функциональной схемы ПО;

2. анализ взаимодействия основных программных модулей;
3. построение эквивалентных схем;
4. определение понятия защищенности;
5. выявление наиболее уязвимых программных модулей;
6. выработка рекомендаций по повышению защищенности программного комплекса.

В зависимости от показателей вероятности защищенности каждого программного модуля в сложных программных системах становится возможным определить влияние отдельных элементов на всю систему в целом для применения комплекса мероприятий (резервирования, тестирования, изменению функциональности и др.) по повышению защищенности.

В случае невозможности тестирования ПО определяются классы ошибок, которые будут оказывать влияние на отказ системы [3]. Классификация таких ошибок в большинстве случаев существенно зависит от функций, выполняемых программным модулем, и требует определения характеристик прогноза на данных. В общем случае к уязвимостям могут приводить ошибки ПО, возникающие в результате нарушения функционирования системного ПО: сбой операционной системы, коллизий в работе параллельных процессов внутри среды, возникновения ошибок внутри прикладной программы.

Многие из них, при наличии соответствующих систем мониторинга, могут быть устранены путем добавления в модуль диспетчерских функций и резервирования в системе программных процессов, предполагающего использование разных настроек в работе ПО (разные адреса размещения в памяти, требуемая точность вычислений и т.д.) [4].

Функционирование диспетчерского ПО, направленного на повышение надежности системы, является вопросом, требующим отдельного обсуждения, поэтому в настоящей работе основной акцент сделан на использование способа «резервирование».

Примеры оценки архитектуры ПО с применением резервирования

Резервирование элементов ПО (например, виртуальных контейнеров, обеспечивающих функции отображения информации на разных рабочих местах) может осуществляться несколькими способами. На рис. 1–3 приведены примеры скользящего резервирования, дублирования линейной последовательности элементов ПО, дублирования элементов ПО в линейной последовательности.

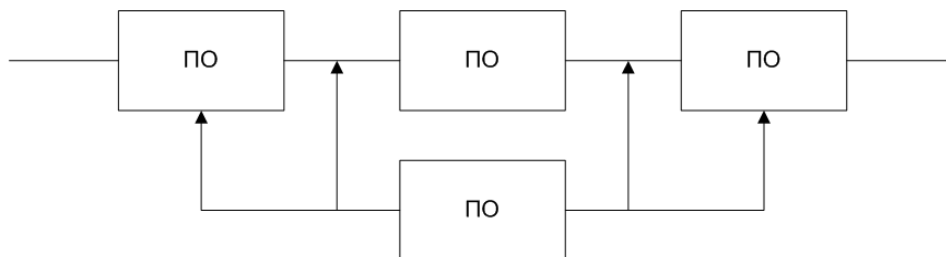


Рис. 1. Скользящее резервирование элементов ПО

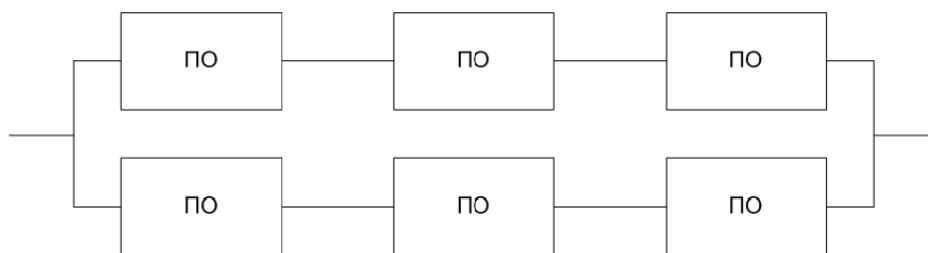


Рис. 2. Дублирование линейной последовательности элементов ПО

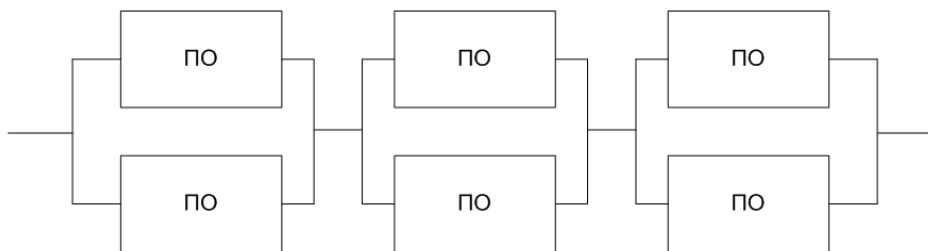


Рис. 3. Позэлементное дублирование в линейной последовательности ПО

Пусть для первого случая, изображенного на рис. 1, для работы программного комплекса системы необходимо r программных элементов, выполняющих функционально одинаковые действия. Для увеличения защищенности ПО создаем n элементов, где $(n-r)$ единиц могут заменить любой из уязвимых элементов последовательности.

Обозначим: r – число необходимых элементов ПО для работы; n – общее число элементов с учетом резервных, которое предполагается создать в системе; p_0 – вероятность защищенной работы одного элемента последовательности; q_0 – вероятность уязвимости одного элемента последовательности.

Вероятность защищенности p_0 каждого элемента оценивается заранее, и может быть получена, например, в результате обработки статистических данных. В общем случае вероятности защищенности каждого из элементов являются независимыми. Тогда вероятность защищенной работы системы p может быть вычислена по формуле [5]

$$p = \sum_{k=r}^n C_n^k p_0^k q_0^{n-k},$$

где $C_n^k = \frac{n!}{(n-k)!k!}$.

На рис. 4 представлены графики зависимостей вероятности защищенности системы от вероятности защищенности одного элемента p_0 , требующей одновременного функционирования $r=10$ элементов ПО, при общем числе элементов n равных 10 (резервирование отсутствует), 15, 20.

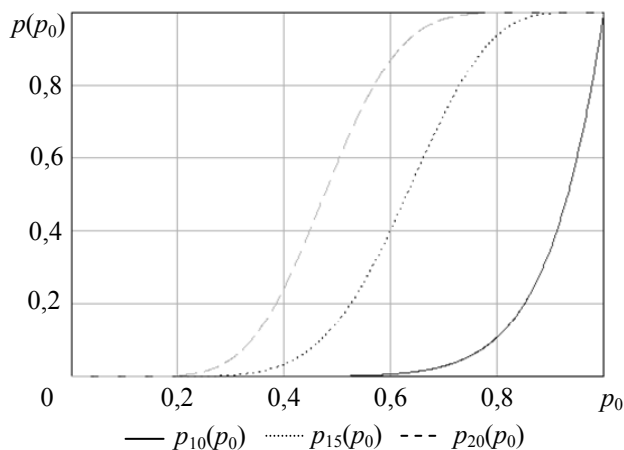


Рис. 4. Зависимость вероятности защищенности системы от вероятности защищенности одного элемента ПО при скользящем резервировании

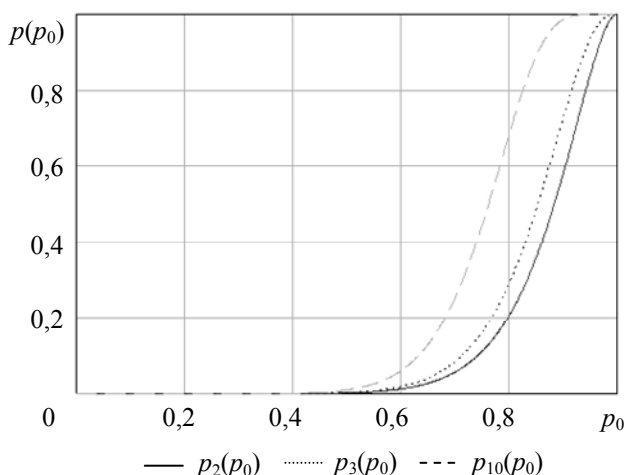


Рис. 5. Зависимость вероятности защищенности системы от вероятности защищенности одного элемента ПО при линейном резервировании

Во втором случае (рис. 2) рассмотрим вероятность защищенной работы программной системы, использующей линейную последовательность элементов. Пусть n – общее число элементов ПО в одной линейке, p_0 – вероятность защищенной работы одного элемента последовательности. Вероятность защищенной работы одной линейки из n элементов ПО p определяется соотношением

$$p = p_0^n.$$

Вероятность защищенной работы дублированной программной системы выражается по формуле:

$$p = 1 - (1 - p_0^n)^2.$$

В общем случае при резервировании k цепочками выражение примет вид

$$p = 1 - (1 - p_0^n)^k.$$

На рис. 5 представлены графики зависимостей вероятности защищенности системы от вероятности защищенности одного элемента p_0 , содержащей число цепочек k , равное 2, 3, 10, по 10 элементов в каждой цепочке.

В третьем случае (рис. 3) рассмотрим цепочку из n программных элементов, где дублируется каждый элемент. При вероятности защищенности одного элемента p_0 соотношение для системы дублированных элементов определяется формулой [6]

$$p = (1 - (1 - p_0)^2)^n.$$

При резервировании одного программного элемента не дублированием, а k элементами вероятность защищенной работы выглядит следующим образом:

$$p = (1 - (1 - p_0)^k)^n.$$

Аналогично предыдущим графикам, на рис. 6 представлена зависимость вероятности защищенности системы от вероятности защищенности одного элемента p_0 , содержащей $n=10$ элементов, где каждый элемент резервируется k равное 2, 3, 10 элементами.

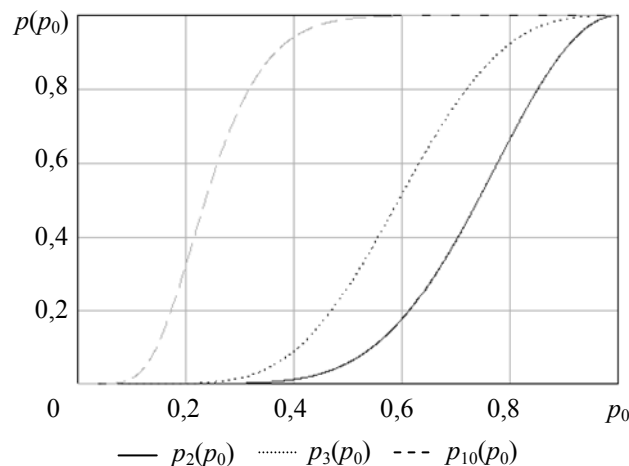


Рис. 6. Зависимость вероятности защищенности системы от вероятности защищенности одного элемента ПО при поэлементном резервировании

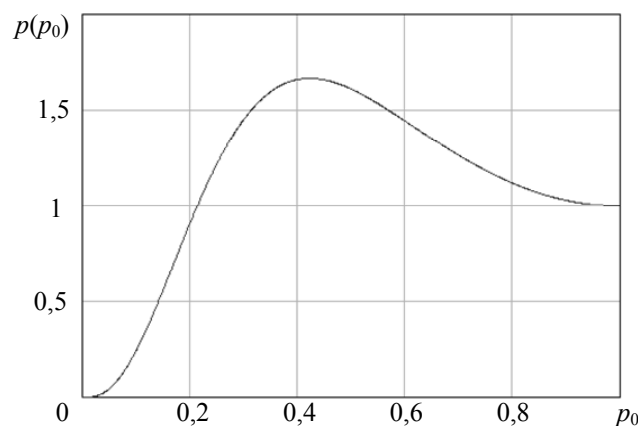


Рис. 7. Зависимость отношения вероятности защищенности различных программных архитектур от вероятности защищенности элемента ПО

Таким образом, предполагая значение вероятности защищенности одного элемента ПО, становится возможным выбрать схему резервирования, исходя из структурных требований к ПО и ресурсоемкости комплекса.

С другой стороны, данный подход позволяет сравнивать архитектуры программных комплексов. Поясним подход на примере. Пусть разработчикам для последнего рассмотренного случая необходимо выбрать структурную схему, позволяющую потенциально достичь наибольшие показатели защищенности. Рассмотрим систему с поэлементным дублированием в линейной последовательности ПО (рис. 3). Допустим, что необходимо обосновать создание последовательности из 3 дублированных элементов ПО, или 6 элементов с четырехкратным резервированием. Для этого составляем отношение

$$p = \frac{(1 - (1 - p_0)^4)^6}{(1 - (1 - p_0)^2)^3}.$$

На рис. 7 приведен график отношения вероятности защищенности архитектур. На графике видно, что если ПО имеет вероятность защищенной работы менее 0,2, то решение, содержащее три дублированных элемента, будет предпочтительнее. На отрезке от 0,4 до 1 вторая архитектура превосходит по отношениям вероятности защищенности первую. Максимальный выигрыш от использования второй архитектуры по сравнению с первой – 1,7 раза при вероятности защищенности ПО, равной 0,4–0,5. При стремлении вероятности защищенности программных модулей обеих архитектур к единице отношение также стремится к единице. Физически это можно объяснить тем, что использование абсолютно защищенного ПО приводит к абсолютной защищенности всего ПО независимо от его архитектуры.

В примере рассмотрен упрощенный случай. Аналогичным образом можно поступать и в более сложных ситуациях.

Заключение

Предложенная методика направлена на оценку защищенности предполагаемых разных архитектур на ранних этапах жизненного цикла программного обеспечения, что позволяет выработать основные принципы и подходы к построению вновь разрабатываемой автоматизированной системы.

Анализ прогнозных результатов расчетов показывает влияние вероятности защищенности каждого элемента программного обеспечения структурных схем, порядка их взаимодействия и количества резервных элементов на вероятность защищенной работы всей системы. Это позволяет выделить наиболее уязвимые элементы программного обеспечения и определить направления повышения защищенности системы.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» по государственному контракту № 07.524.12.4009.

Литература

1. Василенко М.В., Макаров В.А. Модели оценки надежности программного обеспечения // Вестник НГУ. – 2005. – № 30. – С. 126–132.
2. Майерс Г. Надежность программного обеспечения. – М.: Мир, 1980. – 360 с.
3. ISO 9126:1991. Информационная технология. Оценка программного продукта. Характеристики качества и руководство по их применению. – Введ. 01.07.1994. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 18 с.
4. IEEE Std 610.12-1990, IEEE Standard Glossary of Software Engineering Technology (ANSI). – Введ. 28.09.1990. – New York: The Institute of Electrical and Electronic Engineers, 1990. – 84 p.
5. Ушаков И.А. Курс теории надежности систем. – М.: Дрофа, 2008. – С. 27–30.
6. Богатырев В.А., Бибииков С.В. Оценка функциональной безопасности дублированных вычислительных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 2 (78). – С. 146.

- | | |
|-------------------------------------|---|
| Гвоздев Алексей Владимирович | – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, a.gvozdev@icwg.net |
| Зикратов Игорь Алексеевич | – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой, zikratov@cit.ifmo.ru |
| Лебедев Илья Сергеевич | – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, lebedev@cit.ifmo.ru |
| Лапшин Сергей Владимирович | – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, sv.lapshin@gmail.com |
| Соловьев Игорь Николаевич | – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, sin@inbox.ru |

УДК 004.056.53

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ РИСКОВ ПОТЕРЬ ДОСТУПНОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

С.А. Арустамов, М.Г. Генин

Рассматриваются возможности и ограничения резервирования для снижения риска потери доступности критических информационных систем. Приводится описание метода декомпозиции обновлений для снижения риска потери доступности критических систем при проведении обновлений. Доказывается, что использование метода декомпозиции совместно с резервированием снижает риски потери доступности критических систем при обновлениях. Приводится пример, иллюстрирующий эффективность использования метода декомпозиции.

Ключевые слова: информационные системы, резервирование, доступность, риск потери доступности, обновление, метод декомпозиции, простое обновление.

Введение

В работе рассматриваются риски потери доступности программного обеспечения (ПО), не связанные с вмешательством злоумышленников, на примере критических информационных систем (КИС). Будем называть информационные системы критическими, если они имеют жесткие требования по ресурсной доступности. Под доступностью в этой работе будем понимать возможность системы выполнять заявленные функции их легальными пользователями. При этом не будем касаться таких тем, как угроза потери или искажения информации в результате взлома или других злонамеренных действий, хотя, безусловно, эти действия тоже влияют на возможность системы выполнять свои функции [1]. Говоря о доступности, будем рассматривать разного рода неполадки оборудования или ПО, которые не являются результатом чьего-то злого умысла, а происходят из-за сбоев оборудования, ошибок в ПО или являются следствием установленных обновлений. Риск потери доступности определим как пару, состоящую из вероятности наступления того или иного события, приведшего к потере доступности, и ущерба от наступления этого события:

$$R_i = \{P_i, I_i\},$$

где R_i – риск наступления i -го события; P_i – вероятность i -го события; I_i – ущерб от i -го события. Ущерб от i -го события I_i , в свою очередь, может быть представлен в виде составляющих:

$$I_i = \{i_{ij}\}, j = \{1, 2, \dots, N\},$$

где i_{ij} – j -я составляющая ущерба. Такими составляющими могут быть как прямой финансовый ущерб, так и другие виды ущерба, наступившие в результате потери клиентов, уменьшения доли контролируемого рынка, штрафа со стороны надзорных органов, отзыва лицензии и т.д.

Объекты рисков потери доступности

Для дальнейшего рассмотрения рисков потери доступности и их влияния на работоспособность системы представим всю систему в виде составляющих, к которым могут применяться риски потери доступности. Будем рассматривать систему как состоящую из статической и динамической частей. К статической части (СЧ) будем относить то, что воспринимается как «черный ящик», который в случае неполадок можно легко заменить в любой момент без существенного ущерба для работы (каналы связи, сетевое оборудование, серверы, дисковые массивы и т.д.). Например, если сервер, выполняющий определенную роль, может быть легко заменен на резервный, то его тоже можно отнести к СЧ.

К динамической части (ДЧ) будем относить только те ПО и данные, замена которых на аналогичные в случае неполадок или сбоев не приводит к полному восстановлению работы системы без потери функциональности. Такая ситуация может сложиться, если сбой носит логический характер, например, ошибка в коде программы или в структуре базы данных (БД). В этом случае использование резервной копии может оказаться бессмысленным, так как логическая ошибка также будет присутствовать и в ней.

Как правило [2], вопросы обеспечения доступности ПО связываются с применением методов резервирования оборудования, ПО и данных. Рассмотрим возможности и ограничения применения традиционного резервирования для снижения риска потери доступности КИС.

Резервирование как метод снижения рисков потери доступности и области его использования

Для СЧ систем существуют способы добиться такого уровня резервирования, когда система автоматически переключается на работу с резервными ресурсами полностью прозрачно для бизнес-пользователей. Это достигается как на уровне каналов связи [3], когда выполняется автоматическое переключение на резервный канал при потере доступности основного, так и на уровне серверного оборудования [4, 5], когда вместо основного сервера начинает использоваться резервный, будь то сервер приложений или сервер БД.

Что касается возможности и целесообразности использования резервирования для снижения риска потери доступности ДЧ, то здесь ситуация более сложная. Рассмотрим некоторые случаи возможных потерь доступности данных и ПО ДЧ.

Наиболее вероятная причина потери доступности данных – это их физическое повреждение, вызванное аппаратными сбоями. Как показано выше, такая проблема решается наличием так называемого «горячего» резерва оборудования. Более сложный случай – это логическое повреждение данных. В этом случае наличие «горячего» резерва может оказаться недостаточным, так как на «горячей» копии произошли те же самые изменения. Потребуется возврат к состоянию данных до сбоя путем восстановления данных из так называемого «холодного» резерва. При этом данные, введенные после создания последней «холодной» копии, будут утеряны.

В табл. 1 приведена информация об описанных выше типах сбоя данных с точки зрения возможности восстановления работоспособности системы с помощью резервирования.

Виды сбоя данных	Решение	Степень потери доступности	Возможный ущерб
Физическое повреждение данных	Наличие «горячей» резервной копии	С незначительными потерями	Минимальный
Логическое повреждение данных (пример: удаление небольшого количества записей из таблицы, удаление небольшой таблицы)	Возврат к состоянию до сбоя на текущей версии БД, частичное восстановление данных из резервной копии	С частичными потерями	Минимальный – средний
Серьезное логическое повреждение данных (пример: удаление большого количества записей из таблицы, удаление нескольких таблиц, некорректное изменение структуры при обновлении)	Полное восстановление из резервной копии	С существенной потерей	Средний – существенный

Таблица 1. Возможности снижения риска потери доступности путем резервирования (данные)

Перейдем теперь к рассмотрению случаев потери доступности ПО. Самый простой случай – это сбой ПО без влияния на данные. При данном типе сбоя наличие резервной копии ПО (или окружения с ПО) решает проблему доступности. Можно перейти на резервное окружение с ПО при неполадках основного, либо вернуться к предыдущей версии ПО, если проблемы возникли после обновления. Оба варианта реализуемы, так как структура данных не менялась.

Виды сбоя ПО	Решение	Степень потери доступности	Возможный ущерб
Сбой ПО без повреждения данных	Замена оборудования с ПО (текущая версия), замена оборудования с возвратом к предыдущей версии после обновления ПО (возможно, если не менялась структура БД)	С незначительными потерями	Минимальный
Сбой после обновления ПО при измененной во время обновления структуре БД	Возврат к предыдущей версии ПО с частичной потерей данных, введенных после изменения их структуры и обновления ПО (возможно при отсутствии внешних ограничений на структуру данных)	С частичными потерями	Минимальный – средний
Сбой после обновления ПО при измененной во время обновления структуре БД в случае невозможности использовать старое ПО и данные старой структуры (внешние ограничения)	Отсутствует	С полной потерей	Максимальный

Таблица 2. Возможности снижения риска потери доступности путем резервирования (ПО)

Более сложный случай – это сбой после обновления, при котором менялась не только версия ПО, но и структура данных. Простой возврат на предыдущую версию ПО в этом случае невозможен, так как структура данных уже изменилась. Для этого придется еще восстанавливать данные в старой структуре. Однако это может привести к частичной потере данных, введенных в систему после обновления, так как

они уже вводились в новую структуру. Приходится признать, что в случае сбоя такого типа резервирование лишь отчасти решает проблему восстановления доступности системы, так как некоторая потеря данных неизбежна. Самый сложный случай – это предыдущий, но с невозможностью возврата к данным старой структуры из-за внешних ограничений. Такими ограничениями могут быть вступившие в силу с определенной даты новые правила предоставления или обработки информации, нормативные документы, форматы обмена данными и т.д. Необходимо добиваться восстановления работоспособности нового ПО уже на новой структуре данных. Резервирование в данной ситуации не применимо.

В табл. 2 приведена информация об описанных выше типах сбоя ПО с точки зрения возможности восстановления работоспособности системы с помощью резервирования.

Сведем результаты анализа в единую таблицу.

	Без потерь	С частичными потерями	С полной потерей
Аппаратная часть	Возможно		
БД	Возможно при физическом повреждении и при наличии «горячего» резерва. Сводится к резерву на уровне аппаратной части. Ущерб: минимальный	Возможно при логическом повреждении. Возврат к предыдущему состоянию на текущей версии БД, частичное/полное восстановление из резервной копии. Ущерб: минимальный – средний	Только при отсутствии резерва. Ущерб: максимальный
ПО	Возможно при сбое без повреждения данных и без изменения их структуры. Возврат к предыдущей версии ПО. Ущерб: минимальный	Возможно при измененной во время обновления ПО структуре БД и при отсутствии внешних ограничений. Возврат к предыдущей версии ПО и структуре БД. Ущерб: средний – существенный	При измененной во время обновления структуре БД в случае невозможности использовать БД старой структуры (внешние ограничения). Возврат к предыдущей версии ПО и БД невозможен. Ущерб: максимальный

Таблица 3. Возможности снижения риска потери доступности путем резервирования

Как видно из табл. 3 (нижний правый угол таблицы), наиболее рискованной с точки зрения возможностей резервирования является ситуация, когда при обновлении ПО одновременно меняется и структура БД, причем возврат к предыдущей версии ПО и БД невозможен из-за внешних ограничений (рис. 1). В этой ситуации резервирование не поможет в принципе, на каком бы уровне оно ни было организовано.

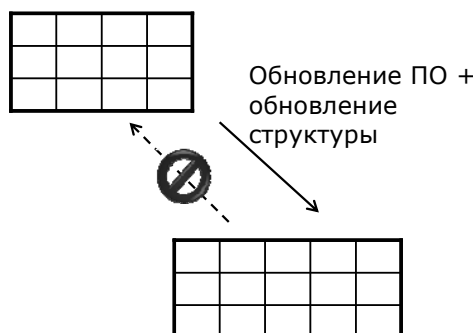


Рис. 1. Ситуация, при которой резервирование не работает

Соответственно, возможный ущерб от возникновения данной ситуации будет максимальным. Для уменьшения рисков доступности, не уменьшаемых с помощью резервирования, авторами предлагается иной подход к рассматриваемой проблематике.

Метод декомпозиции функциональных обновлений

Выше было показано, что наименее рискованными из всех рассмотренных ситуаций являются те, когда за один раз меняется только версия ПО или только структура БД, с возможностью возврата к предыдущему состоянию системы. Для таких ситуаций может применяться резервирование.

Вторая по уровню сложности ситуация – это одновременное обновление ПО и структуры БД, но с возможностью возврата к предыдущей конфигурации. Здесь резервирование применимо, но объем необходимого восстановления будет наибольшим.

Наиболее сложный случай – это одновременное выполнение обновления версии ПО и структуры БД при невозможности возврата к предыдущей версии ПО и БД из-за внешних ограничений. В этом случае резервирование не поможет, а ущерб при этом будет наибольшим. Для снижения риска потери доступности в данном, самом сложном случае, предлагается использовать метод декомпозиции. Суть его в том, чтобы свести наиболее рискованную ситуацию к нескольким, но менее рискованным, т.е. разбить планируемое сложное обновление на несколько с тем, чтобы при одном таком простом обновлении менять либо только структуру БД, либо только ПО (рис. 2).

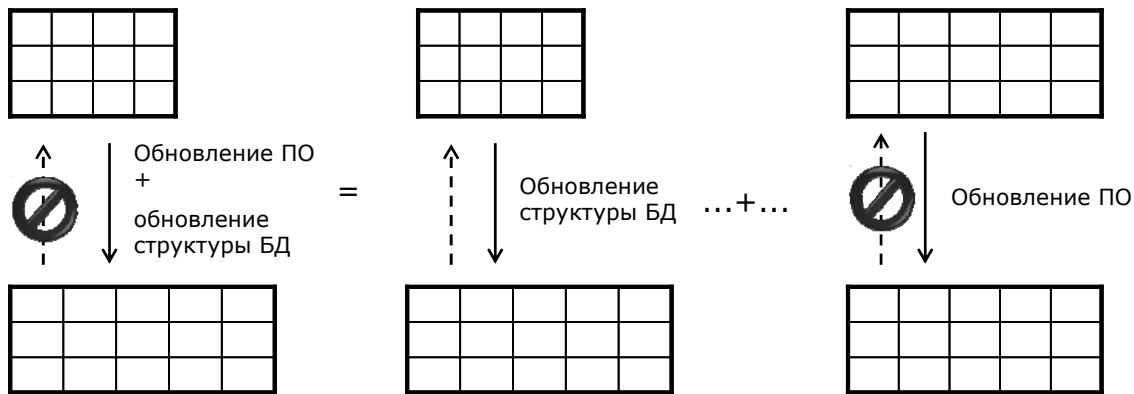


Рис. 2. Разбиение одного общего обновления ПО и БД на несколько отдельных (либо только ПО, либо только БД)

Самое последнее обновление – обновление ПО – в этой цепочке простых обновлений будет включать новую требуемую функциональность, без наличия которой, начиная с определенного момента, система дальше работать не может по тем или иным внешним причинам. Все предыдущие простые обновления (ПО или БД), которые готовят систему к установке последнего, ключевого обновления ПО, могут быть отменены вплоть до установки последнего. На этапе установки каждого из подготовительных простых обновлений возможен возврат к предыдущему состоянию системы, для выполнения которого может применяться резервирование. Возможный ущерб при этом, согласно табл. 3, будет либо минимальным, либо средним. Необходимым условием для такого способа разбиения является работоспособность системы после установки каждого из промежуточных подготовительных обновлений.

Покажем, что применение метода декомпозиции для такого рода обновлений снижает риски потери доступности. Для этого перейдем к формализации описанной методики. Обозначим U^{DB+SW} – все полное сложное обновление, включающее в себя обновление ПО и структуры БД; u_i^{DB} и u_i^{SW} – простые i -е обновления БД и ПО соответственно. Тогда можно записать:

$$U^{DB+SW} = u_1^{DB} + u_2^{SW} + u_3^{DB} + u_4^{SW} + \dots + u_{N-3}^{DB} + u_{N-2}^{SW} + u_{N-1}^{DB} + u_N^{SW}, \quad (1)$$

где N – четное. При этом

$$\forall u_i^{DB} : i \in \{1, 3, 5, \dots, N-1\}, \exists \bar{u}_i^{DB},$$

$$\forall u_j^{SW} : j \in \{2, 4, 6, \dots, N-2\}, \exists \bar{u}_j^{SW},$$

$$\text{для } u_N^{SW} \text{ не существует } \bar{u}_N^{SW},$$

т.е. все обновления, кроме последнего, обратимы.

Можно перейти от этой нотации к более простой. Отметим, что в (1) все нечетные обновления являются обновлениями БД, а четные – обновлениями ПО. Обозначим

$$U = U^{DB+SW},$$

$$u_i = u_i^{DB}, \forall i \in \{1, 3, 5, \dots, N-1\},$$

$$u_j = u_j^{SW}, \forall j \in \{2, 4, 6, \dots, N\},$$

где N – четное. Тогда формула (1) приобретает следующий упрощенный и обобщенный вид:

$$U = u_1 + u_2 + u_3 + u_4 + \dots + u_{N-3} + u_{N-2} + u_{N-1} + u_N, \quad (2)$$

$$\forall u_i : i \in \{1, \dots, N-1\}, \exists \bar{u}_i,$$

$$\text{для } u_N \text{ не существует } \bar{u}_N.$$

Разложение обновления на составляющие в виде (2) полностью¹ соответствует определению полного обновления U как суммы простых обновлений u_i , которое было введено в [6]. Действительно:

1. в определенный момент времени устанавливается только одно обновление u_i ;
2. после успешной установки каждого обновления u_i система работоспособна;
3. в случае возникновения проблем после установки любого обновления u_i возврат к предыдущему состоянию системы происходит за допустимый интервал времени и либо не приводит к потере данных вообще, либо приводит лишь к минимальной потере данных, связанных с новым функционалом.

В этом случае, в соответствии с [6], можно сделать вывод о том, что вероятность успешной установки полного обновления U в формуле (2), выполненного методом декомпозиции, будет выше, чем при выполнении всего обновления U сразу. Так как формула (1) является частным случаем формулы (2), то данный вывод справедлив и для исходного разложения U^{DB+SW} на составляющие u_i^{DB} и u_i^{SW} . Так как возможный ущерб от ошибок и их последующего исправления при выполнении простых обновлений u_i^{DB} или u_i^{SW} будет либо минимальным, либо средним, то можно сделать вывод о том, что полное обновление U , выполненное методом декомпозиции, менее рискованно, чем выполненное единовременно, когда ущерб может быть максимальным.

Таким образом, метод декомпозиции может быть использован совместно с резервированием для снижения риска потери доступности при проведении комплексных обновлений критических информационных систем. Действительно, все подготовительные обновления, кроме последнего, обратимы. Риск потери доступности для них может быть снижен путем резервирования. Последнее «простое» обновление является обновлением ПО и лишь «включает» требуемую функциональность. Оно тоже обратимо, однако при этом необходимая функциональность будет недоступна. Что же касается риска сбоя последнего «простого» обновления, то он существенно ниже риска сбоя всего полного обновления U . В случае ошибки ПО в последнем обновлении легче локализовать ошибку и организовать процесс ее исправления.

Описание экспериментов, тестирующих предложенную методику

Для проверки предложенной методики использовалась инфраструктура финансового-кредитного учреждения (ФКУ) с головным отделением в Санкт-Петербурге и филиалом в Москве. В каждом из офисов были созданы тестовые платформы, на которых была развернута система дистанционного банковского обслуживания (система «Банк–Клиент», далее БК).

Система БК предоставляет удаленным клиентам возможность обмена документами с ФКУ в режиме веб-доступа (онлайн-клиенты) и с помощью приложения с БД на стороне клиента с доступом в ФКУ по модему, либо через Интернет (оффлайн-клиенты). В ФКУ система состояла из веб-сервера для подключения онлайн-клиентов, транспортной станции для подключения оффлайн-клиентов, общего сервера БД и сервера обмена данными с приложениями ФКУ.

На каждой тестовой платформе в ФКУ была развернута одна банковская часть, обслуживающая по 5 онлайн- и оффлайн-клиентов. Обновление, которое предполагалось применить на обеих тестовых платформах, добавляло новый функционал в один из существующих типов документов. Изменялась структура документа, добавлялись новые поля, новые справочники, новые правила контроля. Формат файлов обмена с внешними подсистемами расширялся за счет добавления новых полей. Обновление затрагивало почти все части системы. Менялась структура БД, процедуры обмена данными, веб-сервер (для онлайн-клиентов), клиентское приложение с собственной БД для оффлайн-клиентов. Неизменной оставалась только транспортная станция.

Пакет обновления был подготовлен в двух вариантах – для единовременной установки и для поэтапной установки. При единовременной установке предполагалось одновременное обновление клиентской платформы и платформы ФКУ. Для обновления оффлайн-клиентов новая версия приложения была предварительно разослана клиентам.

Пакет обновления для поэтапной установки был разбит на части, каждую из которых нужно было устанавливать отдельно в определенной последовательности. Для подтверждения корректности установки каждой из частей пакета система должна была отработать в продукции не менее одного дня перед установкой, следующей по порядку части. Обновление в ФКУ включало в себя расширение структуры БД, добавление новых справочников, обновление ПО сервера обмена данными с использованием режима совместимости со старым и новым форматом обмена, обновление ПО веб-сервера. У оффлайн-клиентов обновлялась версия ПО с применением режима совместимости со старой структурой документа. После того, как все оффлайн-клиенты подтверждали факт обновления ПО у себя, режим совместимости отключался на стороне ФКУ.

¹ Запрет на возврат к предыдущему состоянию системы для последнего простого обновления u_N в (2) обусловлен исключительно внешними ограничениями и не является свойством самого обновления u_N . Технически возврат системы от u_N к u_{N-1} возможен, однако при этом требуемая функциональность будет недоступна.

В табл. 4 приведены данные об ошибках, возникших во время установки обновлений на тестовые платформы в офисах Санкт-Петербурга и Москвы.

	Время установки всех обновлений	Всего ошибок	Из них привели		Максимальное время полной недоступности системы
			к частичной недоступности	к полной недоступности	
Тестовая платформа 1, единовременная установка (офис в Санкт-Петербурге)	1 день	3	2 Устранены за 15 мин	1 Устранена за 48 часов	48 часов
Тестовая платформа 2, поэтапная установка (офис в Москве)	12 дней	2	2 Устранены за 15 мин	–	–

Таблица 4. Данные о потере доступности системы при установке обновлений

Как видно из приведенных данных, поэтапная установка обновлений заняла существенно больше времени по сравнению с единовременной, но при этом оказалась гораздо менее рискованной с точки зрения доступности приложения.

Заключение

Были рассмотрены возможности и ограничения резервирования для снижения риска потери доступности информационных систем, в частности, при проведении обновлений. Предложен метод декомпозиции, который позволяет снизить риски при проведении комплексных обновлений критических информационных систем. Доказано, что риск потери доступности критических информационных систем при проведении комплексных обновлений снижается при использовании метода декомпозиции. Проведено тестирование предложенного метода, которое подтвердило корректность приведенных положений.

Литература

1. Арустамов С.А., Генин М.Г. Минимизация рисков потери доступности программного обеспечения после установки обновлений или изменения функциональности // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 3 (73). – С. 111–116.
2. Резервное копирование как неотъемлемый элемент обеспечения ИБ. Информационная безопасность [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.itsec.ru/articles2/control/rezervnoe-kopirovanie-kak-neotemlemyi-element-obespecheniya-ib>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 26.03.2012).
3. Резервирование сетевых соединений в критически важных приложениях. Network Systems Group [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.nsg.ru/doc/whitepapers/wp_nsg_dualuplink.pdf, свободный. Яз. рус. (дата обращения 26.03.2012).
4. High availability. That works. Vision solutions [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.visionsolutions.com/Products/High-Availability-Overview.aspx>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 26.03.2012).
5. Check Point High Availability for IP Appliances. CheckPoint [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.checkpoint.com/products/ip-appliances/check-point-high-availability.html>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 26.03.2012).
6. Генин М.Г. Методика проведения обновлений, снижающая риски доступности информационных ресурсов. Информатика, моделирование, автоматизация проектирования // Сборник научных трудов / Под ред. Н.Н. Войта. – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – С. 125–137.

Арустамов Сергей Аркадьевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, sergey.arustamov@gmail.com

Генин Михаил Геннадьевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, gmg@rambler.ru

УДК 33.334

**РАЗРАБОТКА НОВОГО МАРКЕТИНГОВОГО ИНСТРУМЕНТА
ДЛЯ ПРОДВИЖЕНИЯ НА РЫНОК КОНКУРЕНТОСПОСОБНЫХ ВУЗОВСКИХ
ИННОВАЦИОННЫХ РАЗРАБОТОК**

Д.Ю. Миронова

Рассматриваются различные подходы для вовлечения представителей научно-исследовательских и бизнес-структур в инновационно-предпринимательскую деятельность, а также предлагается разработка нового комплексного маркетингового подхода для продвижения на рынок конкурентоспособных вузовских разработок.

Ключевые слова: маркетинг, конкурентоспособность разработок, деловая сеть, инновационно-предпринимательская деятельность.

Введение

Россия вступает в новый период создания инновационной экономики на базе ускоренного развития науки, образования и высоких технологий. К настоящему времени существует понимание того, что становление инновационного характера российской экономики надо начинать с университетов – как центров фундаментальной науки, так и кадровой основы инновационного развития. Для успешной реализации научного и инновационного потенциала России профессорско-преподавательский состав высших учебных заведений (вузов), ученые академических и отраслевых научно-исследовательских институтов (НИИ) должны консолидировать свои усилия.

Внедрение вузовских разработок в реальный сектор экономики является проблематичным, поскольку до сих пор не созданы условия, которые могли бы мотивировать ученых взаимодействовать с бизнесом. Обмен опытом, налаживание сотрудничества как в России, так и за рубежом часто происходит через различные деловые сообщества, сети, ассоциации, которые стимулируют участников, расширять профессиональные компетенции и деловые связи. Сформированные сетевые партнерства стимулируют процессы трансфера технологий за счет активизации международного обмена знаниями, опытом, формирования деловых контактов.

Однако до сих пор не созданы механизмы, в том числе и маркетинговые, направленные на содействие в инициации и реализации рыночного потенциала инновационных, научных и образовательных проектов. В связи с этим в данном исследовании анализируются российские и зарубежные деловые сети в области маркетинга, созданные преимущественно на базе вузов, а также различные подходы для вовлечения представителей научно-исследовательских и бизнес-структур в инновационно-предпринимательскую деятельность. В работе также предлагается разработка нового комплексного маркетингового подхода для продвижения на рынок конкурентоспособных вузовских разработок и ускорения их коммерциализации.

Роль маркетинга в коммерциализации вузовских инновационных разработок

Процесс оценки рыночного потенциала инновационных разработок позволяет выявить перспективные проекты и отклонить разработки, не востребованные рынком. Для вывода на рынок перспективных проектов необходимо активное вовлечение разработчиков и компаний-потребителей в процессы переговоров и обсуждений конкретных проектов.

В развитых странах вузы проводят активную инновационную политику, и в качестве основной формы реализации инновационной деятельности учебного заведения выступает инновационный проект [1]. В настоящее время наблюдается тенденция развития вузов по пути «предпринимательского университета» (entrepreneurial university [2–4]). «Предпринимательский университет – это высшее учебное заведение, которое систематически прилагает усилия по преодолению ограничений в трех сферах – генерации знаний, преподавании и преобразовании знаний в практику – путем инициирования новых видов деятельности, трансформации внутренней среды и модификации взаимодействия с внешней средой» [5].

Для вывода инновационных проектов на отечественный и зарубежный рынки и их успешной коммерциализации необходима разработка маркетингового комплекса. Инновационные проекты могут находиться на разных стадиях развития (от идеи до массового производства), и их маркетинговая поддержка в том или ином виде требуется на каждой стадии жизненного цикла. Также важно отметить, что развитию проекта должны содействовать, помимо маркетингового подразделения, все подразделения университета, осуществляющие информационно-консультативную помощь как в области проектного менеджмента, фандрайзинга, так и в области экономики, юриспруденции, патентования и пр. [6, 7].

Необходимо понимать, что маркетинг важен на всех стадиях формирования проекта – от стадии идеи до стадии вывода конечного продукта на рынок. На стадии идеи роль маркетинга состоит в определении рыночного потенциала проекта, его перспективности и своевременности. На стадиях разработки прототипа, опытного образца в задачу маркетинга может входить, например, исследование того, насколько технико-эксплуатационные параметры изобретения удовлетворяют потенциальных заказчиков. Таким образом, маркетинговая стратегия малого инновационного предприятия и план маркетинга должны быть разработаны еще до вывода готового продукта на рынок.

При этом не стоит забывать, что далеко не все ученые имеют опыт предпринимательской деятельности. Тесное взаимодействие представителей науки с представителями бизнеса позволяет помочь ученым, занимающимся только наукой, развивать их научные идеи с учетом требований рынка.

Анализ рынков выпускаемой и намеченной к производству продукции, сырья, капиталов и рабочей силы совершенно невозможно провести без маркетинговых исследований. Задача исследователя-предпринимателя состоит в том, чтобы осуществлять решение возникающих у потребителя проблем с минимальным риском и максимумом полезности как для потребителя, так и для себя. При этом задача маркетолога, маркетинговой службы заключается в том, чтобы обеспечить руководителя или соответствующие инстанции, ответственные за принятие решений, качественной маркетинговой информацией [8].

Таким образом, отталкиваясь от будущей продукции, планируемой компаниями к производству через несколько лет, ученые имеют возможность развивать свои исследования в направлениях, перспективных для бизнеса и с учетом тенденций развития рынка. Однако когда инновационный продукт уже разработан и создан стартап, очень часто оказывается, что такой продукт не нужен рынку. Причиной подобной неудачи может быть как несвоевременное проведение маркетингового исследования (проведенного уже после создания готового продукта), так и привычка ученого при проведении переговоров акцентировать внимание потенциальных заказчиков на технических особенностях продукта, а не экономических выгодах компании от внедрения инновационной разработки.

Анализ сетевых структур в области маркетинга

Большую роль в инновационном развитии играет международное сотрудничество и международный обмен. Информационный обмен является необходимым элементом при коммерциализации результатов интеллектуальной деятельности, поскольку это реальный инструмент для оценки актуальности и перспективности разработок международным научно-техническим сообществом. Именно формирование сетевых партнерств стимулирует процессы трансфера технологий, тем самым давая толчок к интернационализации коммерциализации [9, 10]. При этом под сетевыми партнерствами будем понимать интеграцию интеллектуальных, кадровых, финансовых, информационных ресурсов, позволяющую членам партнерства извлекать максимальную выгоду от участия в данном сообществе.

Для успешного развития вуза и коммерциализации его разработок необходимо решение следующих задач:

- объединение исследователей со схожими научными интересами с целью формирования новых проектов;
- стимулирование взаимодействия представителей науки и бизнеса;
- выявление спроса корпораций на проводимые в вузе исследования и разработки и анализ исследований, в которых бизнес может быть заинтересован;
- содействие проведению своевременных маркетинговых исследований для проектов с целью их финансирования.

Решение подобных задач в различных университетах решается по-разному. Представители ВУЗов часто входят в различные сети, чтобы устанавливать новые профессиональные, деловые связи внутри регионального, национального и международного сообщества, чтобы быть осведомленными о развитии научных исследований в той или иной области и иметь возможность найти в сети единомышленников для реализации совместных исследований и решения конкретных задач.

В настоящее время в России и за рубежом существует множество деловых сообществ с различными интересами, объединенных преимущественно в социальные сети. При этом цели создания деловых сетей сильно разнятся. Например, одни сети содействуют поиску финансирования за счет вовлечения в среду авторов проектов и инвесторов, другие сети объединяют исследователей по конкретным тематическим областям, позволяя им делиться информацией, искать коллег, проводящих схожие исследования и разработки и пр. В настоящей работе проводится сравнение различных деловых сетей, имеющих маркетинговую направленность.

В России, например, организована сеть мастерства «Развитие форм межфирменной кооперации», основной целью которой является повышение научного и образовательного потенциала путем организации научно-образовательного взаимодействия исследователей и преподавателей как в России, так и за рубежом. Объединение участников этой сети направлено на преодоление фрагментации исследовательского пространства и достижение долгосрочной интеграции исследовательского потенциала участников,

на определение эффективных и устойчивых методов проведения исследований, получение научных результатов и распространение новых знаний за пределы сети.

В американском университете Санта Клары организована маркетинговая сеть (<http://www.scu.edu/business/inc/mn/index.cfm>), дающая своим выпускникам возможности дальнейшего обучения, налаживания деловых контактов с представителями бизнес-сообщества и развития карьеры в области маркетинга. В этой сети можно взаимодействовать с ведущими маркетинговыми специалистами и экспертами отрасли, оставаться в курсе последних маркетинговых тенденций, принимать участие в маркетинговых исследованиях и т.д.

Еще одна деловая маркетинговая сеть была создана в университете Астона в Великобритании (<http://www.astonumni.org/NetCommunity/Page.aspx?pid=758>). Данная сеть («The Aston Marketing Network») предназначена для выпускников университета, студентов и коллег, заинтересованных в маркетинге. Целью создания сети явилось предоставление международной среды для обмена передовым опытом во всех сферах маркетинга и оказания помощи участникам устанавливать новые контакты в этой области. Членами сети могут быть как специалисты по маркетингу, так и выпускники и студенты, не имеющие опыта в маркетинге, но желающие развивать свои знания и навыки в этой области.

Маркетинговая сеть, созданная в университете Минесоты, США, (<http://www.csom.umn.edu/cms/page4953.aspx>), ставит своей целью проведение маркетинговых занятий, привлекая специалистов по маркетингу в кампус в качестве приглашенных докладчиков. Также целью сети является обмен опытом во всех сферах маркетинга и помощь участникам устанавливать новые контакты в этой области.

Существуют и студенческие сети, например, McGill Marketing Network (<http://mmn.musonline.com/>), направленные на вовлечение студентов в маркетинговую деятельность через участие в исследовании рынка, обмен информацией, знаниями друг с другом и с профессионалами в области маркетинга.

Таким образом, сетей, вовлекающих различных специалистов по маркетингу, достаточно много, и практически все они ставят своей целью обмен опытом и повышение знаний и навыков участников в области маркетинга и, безусловно, расширение деловых связей. Однако ни одна из представленных выше и аналогичных деловых сетей в области маркетинга не ставит своей целью содействие в инициации и реализации рыночного потенциала инновационных, научных и образовательных проектов, а концентрируется в основном на расширении деловых связей команд проектов. В связи с этим в данном исследовании предлагается и обосновывается создание новой деловой сети «Маркетинг в инновациях, образовании и науке», сочетающей комплексный подход, объединяющий в себе возможности поиска, формирования, ускорения запуска и коммерциализации проектов за счет своевременного проведения маркетинговых исследований, содействия разработке рыночной (бизнес) модели, обеспечения кооперации и взаимодействия ее участников.

Разработка механизма продвижения образовательных, научных и инновационных проектов посредством сети «Marketing to Innovation, Education, Science Business Network» (M2IES)

Для коммерциализации разработок вузов и НИИ, а также более эффективного и своевременного вывода перспективных проектов на рынок, своевременного проведения маркетинговых исследований, выявления заинтересованности потенциальных потребителей в той или иной разработке в настоящей работе предлагается создание деловой сети «Marketing to Innovation, Education, Science Business Network» (Маркетинг в инновациях, образовании и науке, http://marketing.ifmo.ru/?page_id=239). Сеть решает следующие задачи.

- *Своевременное проведение маркетинговых исследований.* Для успешного вывода на рынок технологических инноваций на первом месте всегда стоят грамотные и своевременные маркетинговые исследования. Часто теоретически перспективные проекты, обладающие высоким рыночным потенциалом, рискуют провалиться, если не удастся найти потенциальных потребителей.
- *Формирование среды для взаимодействия специалистов в приоритетных для университета областях:* информационно-коммуникационные технологии, биоинформатика, мехатроника и пр. Необходимо налаживать взаимодействие между учеными университета, работающих в смежных областях исследований, а также с учеными других университетов и представителями компаний, способными оценить перспективность проектов.
- *Формирование бизнес-моделей, маркетинговых стратегий, необходимых для эффективной коммерциализации технологий.* Бизнес-модель логически описывает способ создания, продажи и доставления ценности клиентам, на основе которого компания осуществляет свою деятельность [11, 12]. Для коммерциализации инновационных технологий важно сформулировать их потенциальную ценность для потребителя, определить механизмы вывода этих технологий на рынок, а также эффективно распределить используемые организацией ресурсы с целью создания устойчивого конкурентного преимущества и извлечения максимальной прибыли.

- *Повышение квалификации в области маркетинга и предпринимательства (семинары, стажировки, консультации).* Сотрудники, аспиранты, студенты как экономических, так и технических специальностей университета смогут повысить свои знания в областях экономики и бизнеса, познакомиться с современными программными продуктами и методиками проведения маркетинговых исследований.
- *Объединение специалистов технического профиля и экономистов для создания проектных команд.* Реализация проекта требует кооперации сил и знаний работников самых различных сфер деятельности. Деловая сеть M2IES позволит обеспечить такое объединение.
- *Вовлечение в сеть сотрудников и студентов зарубежных ВУЗов и формирование международных проектных команд.* Международное сотрудничество – одно из наиболее перспективных направлений работы деловой сети. Возможность обмена знаниями, опытом, кадрами с ведущими зарубежными инновационными центрами создаст дополнительный стимул для всех заинтересованных лиц стать участниками такого объединения.
- *Вовлечение российского и зарубежного бизнеса в деятельность сети.* Бизнес заинтересован в том, чтобы быть в курсе современного уровня исследований и разработок в ВУЗах. Благодаря его присутствию на тематических мероприятиях (по информационно-коммуникационным технологиям, биоинформатике и пр.) возможно привлечение заказных (контрактных) исследований в университет, а также финансирование перспективных проектов. Кроме того представители компаний могут поделиться опытом, рассказать о своем видении будущих продуктовых линеек и т.д.

В сеть могут входить студенты, аспиранты, преподаватели, сотрудники лабораторий и исследовательских институтов. Следующий этап должен привести к стыковке данной сети с бизнес-сообществом. Речь в данном случае идет не только о компаниях – потенциальных потребителях университетских исследований или существующих разработок, компаниях – будущих работодателях, но и об успешных бизнесменах, готовых поделиться своими знаниями и опытом и помочь в решении различных бизнес-задач, развития предпринимательских навыков.

Заключение

В данном исследовании были проанализированы различные деловые сети, имеющие маркетинговую направленность. Этот анализ свидетельствует о том, что созданные сообщества не ставят своей целью содействие в инициации и реализации рыночного потенциала проектов, а концентрируются в основном на расширении деловых связей участников данных сообществ.

Кроме того, в результате проведенного исследования было выявлено, что успешному продвижению инновационных разработок на рынок и их коммерциализации способствует систематическое поддержание контактов разработчиков (команды проекта) с потенциальными потребителями, а также понимание командой бизнес-модели и ее корректировка в зависимости от меняющихся условий рынка. Следствием этого явилось создание нового маркетингового инструмента для продвижения на рынок конкурентоспособных вузовских инновационных разработок – деловой сети «Marketing to Innovation, Education, Science Business Network», сочетающей комплексный подход, объединяющий в себе осуществление поиска, формирование, ускорение запуска и коммерциализацию проектов за счет своевременного проведения маркетинговых исследований, а также обеспечения кооперации и взаимодействия ее участников.

Литература

1. Управление высшим учебным заведением / Под ред. С.Д. Резника, В.М. Филиппова. – 2-е изд., перераб. – М.: ИНФРА-М, 2010. – 767 с.
2. Clark B.R. Creating Entrepreneurial Universities: Organizational Pathways of Transformation. – Oxford: Pergamon Press for International Association of Universities, 1998. – P. 123–125.
3. Meira Soares V.A., Amaral M.S.C. The Entrepreneurial University: a Fine Answer to a Difficult Problem? // Higher Education in Europe. – 1999. – V. 24. – № 1. – P. 11–21.
4. Subotzky G. Alternatives to the Entrepreneurial University: New Modes of Knowledge Production in Community Service Programs // Higher Education. – 1999. – V. 8. – № 4. – P. 401–440.
5. Константинов Г.Н., Филонович С.Р. Что такое предпринимательский университет // Вопросы образования. – 2007. – № 1. – С. 49–62.
6. Дюков И.И., Миронова Д.Ю. Повышение конкурентоспособности вуза как результат коммерциализации его образовательной, научной и инновационной деятельности // Сборник статей одиннадцатой международной конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности». – СПб, Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – Т. 3. – С. 25–26.

7. Дюков И.И. Система образования страны как основополагающая составляющая ее конкурентоспособности // Экономика и управление. – 2010. – № 10. – С. 80–86.
8. Багиев Г.Л., Богданова Е.Л. Маркетинг-статистика: Учебное пособие. – М., 2000 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.marketing.spb.ru/read/m9/index.htm>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 25.03.2012).
9. Дюков И.И., Миронова Д.Ю. Международный портал информационных технологий и оптики: специфика формирования распределенной среды для инновационных научных исследований // Сборник научных статей XIV всероссийской объединенной конференции «Интернет и современное общество». – СПб, 2011. – С. 58–62.
10. Мурашова С.В. Научные предпосылки менеджмента интеллектуальной собственности в решении задач инновационного развития России // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 2 (78). – С. 117–120.
11. Magretta J. Why business models matter // Harvard Business Review. – 2002. – V. 80. – № 5. – P. 86–92.
12. Timmers P. Business models for electronic markets // Electronic Commerce in Europe. – 1998. – № 8. (April). – P. 1–6.

Миронова Дарья Юрьевна – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, начальник отдела, mironova@mail.ifmo.ru

УДК 339.137.22

УПРАВЛЕНИЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬЮ ТОРГОВЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В УСЛОВИЯХ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ

О.В. Чернышева

Представлены основные результаты исследования проблемы управления конкурентоспособностью торговых предприятий в условиях динамичного инновационного развития. Рассмотрены проблемы укрупнения операторов рынка, возрастание роли сети Интернет в жизни потребителя XXI в., стратегии развития отечественного и западного ритейла и др. Предложены пути, позволяющие предприятию выживать в условиях обостряющейся конкуренции.

Ключевые слова: конкурентоспособность, ритейл, инновации, консолидация, виртуальная торговля.

Введение

Современный этап экономического развития характеризуется быстрой сменой устоявшихся подходов к организации торгово-технологического процесса и управлению персоналом, развитием продаж с использованием сети Интернет, а также внедрением части инновационных разработок в процесс доведения товара от производителя к потребителю. Таким образом, основной задачей предприятия XXI в. является четкое соответствие требованиям окружающей рыночной среды в целях поддержания своей конкурентоспособности.

Торговля и индустрия развлечений – выгодное соседство и атрибут конкурентоспособности

Основным направлением в торговой отрасли последних лет стало тесное соседство торговой и развлекательной составляющих. Современный торговый центр невозможно представить без кинотеатра, площадок для детей, катков, еженедельных представлений для детей, импровизированных сцен, сотен кафе, баров, ресторанов, фитнес-центров и пр. Развлечения в торговле прочно вошли в жизнь и сознание потребителя. Развлечения заставляют потребителя оставаться в зоне торговли более продолжительный промежуток времени. Доходность проектов, сочетающих в себе развлекательные и торговые функции, значительно выше, а аренда площадей под развлекательные направления деятельности зачастую намного ниже, чем под площади с торговыми функциями.

К необходимости настойчивого привлечения потребителя в зоны непосредственной реализации товаров приводит развитие торговли через Интернет. Многие магазины, в том числе виртуальные, не могут осуществлять продажи отдельных видов товаров из-за ограниченных возможностей в области логистических процедур, а также из-за отсутствия соответствующей разрешительной документации. По этой причине и возникает неудовлетворенный спрос. Несмотря на это, компании, занимающиеся реализацией товаров посредством Интернет-технологий, имеют достаточно хорошие показатели хозяйственной деятельности и отличаются высокими темпами роста и высокими показателями капитализации. Например, капитализация такой онлайн-компании, как Amazon.com, составляет свыше 40 млрд долларов, а у eBay – свыше 35 млрд долларов.

Потребитель должен контактировать с товаром непосредственно, что вызовет, в свою очередь, импульсные покупки, а, следовательно, увеличит выручку предприятия.

По статистике Jones Lang LaSalle, развлекательная составляющая есть в 70% и 78% торговых центров Москвы и Санкт-Петербурга соответственно. Средняя доля развлечений в торговых центрах Моск-

вы – 10%, Санкт-Петербурга – 15%, учитывая комплексы, где такая функция есть в принципе. Максимальная доля в торгово-развлекательных комплексах Санкт-Петербурга достигает 20% [1].

Консолидация – главное направление в торговле XXI в.

Многие торговые предприятия в процессе своей деятельности кардинально меняют стратегии развития. Например, недавно компания «Дикси» приобрела 100% акций сети «Виктория». После объединения магазины стали иметь формат «магазины у дома».

Отечественные предприятия торговли существенно отличаются от западных аналогов. Во-первых, в России часто подменяют понятия. Например, европейские дискаунтеры располагаются за пределами города, имеют высокий удельный вес private label (частных марок). Таким образом, дискаунтеры, расположенные на территории Российской Федерации, не удовлетворяют «европейским параметрам», что связано, главным образом, с тем, что отечественный потребитель не имеет возможности закупать товары большими объемами ввиду отсутствия как физических, так и финансовых возможностей. Многие торговые сети существуют в виде «модифицированных» форматов своих западных аналогов, что позволяет охватить большее количество сегментов потребителей.

По данным журнала «Эксперт», по показателю выручки в 2010 г. места распределились следующим образом: X5 Retail Group, «Магнит», Auchan, Metro Cash&Carry, «Дикси»+«Виктория», «О'Кей» «Лента», «Дикси», «Седьмой континент», «Спар», «Виктория», «Монетка» [2].

Данные об объемах продаж крупнейших торговых сетей России приведены в таблице [3].

	2008 г.	2009 г.	2010 г.	2010/ 2009 г.
1. X5 Retail Group	207 244	276 167	342 476	124,0%
2. «Магнит»	132 684	169 615	236 110	139,2%
3. Auchan Group	128 062	158 358	178 143	112,5%
4. Metro Cash & Carry	121 931	127 543	132 484	103,9%
5. М.Видео	66 371	71 202	87 218	122,5%
6. «О'Кей»	51 143	67 875	82 667	121,8%
7. Эльдorado	89 000	72 111	83 453	115,7%
8. «Лента»	53 163	58 809	76 232	129,6%
9. «Дикси Групп»	44 867	53 285	65 288	122,5%
10. Евросеть	55 156	55 169	61 900	112,2%
11. Группа компаний «Связной»	34 597	46 781	55 407	118,4%
12. «Седьмой континент»	37 026	43 792	46 660	106,5%
13. ИКЕА Дом	30 993	35 134	39 922	113,6%
14. ГК «Виктория»	29 803	29 803	34 269	115,0%
15. ГК «Спортмастер»	14 126	22 853	32 980	144,3%
Источник: База данных СПАРК, анализ Интерфакс-Агентство корпоративной информации				

Таблица. Ранжирование крупнейших торговых сетей России по объему продаж в 2010 г., млн руб.

В том случае, если экономика России будет развиваться по инновационному сценарию, к 2020 г. доля современных форматов розничной торговли, в том числе супермаркетов, дискаунтеров, торговых центров и магазинов шаговой доступности, в стране увеличится с 35% до 70%. Так считает Министерство промышленности и торговли. При инерционном и энергосырьевом вариантах развития экономики современные форматы будут развиваться медленнее, и к 2020 г. их доля в общем обороте составит 60% и 65% соответственно. По прогнозам, доля сетей в розничной торговле к 2020 г. достигнет уровня 65%, доля малых предприятий, напротив, по прогнозам будет уменьшаться – до 22% в 2020 г. [4].

Потребитель XXI в. – ориентир на инновации либо на стандарты прошлого

Потребитель XXI в. имеет две основные характеристики. С одной стороны, он использует новые форматы торговли, развлечений. С другой стороны, потребитель оглядывается в прошлое, выбирая для себя продукты натуральные, экологически чистые, без добавок. При этом сегмент экопродуктов на российском рынке крайне ограничен, что связано как с высокими ценами, так и с ограниченностью поставщиков и производителей таких товаров.

Инновации в какой-либо отрасли часто граничат с проблемами здоровья нации. Новинки техники зачастую пагубно отражаются на здоровье, способствуют положительной динамике показателя роста числа заболеваний, вызываемых их использованием. Конечно, параллельно разрабатываются новые методики лечения, в том числе безоперационные. Однако такие методики доступны не всем сегментам по-

требителей, а подчас темпы роста заболеваемости опережают темпы роста развития медицины в данной области. Бесспорно, многие новинки облегчают жизнь, сокращают потери времени, но вызывают необратимые последствия для организма человека, приводя в ряде случаев к необратимым последствиям.

Инновационное развитие торгового предприятия должно иметь четкую взаимосвязь с инновационным потенциалом персонала. Большинство торговых предприятий России страдают именно из-за этой «несостыковки». Персонал неспособен грамотно воспользоваться предлагаемым оборудованием и технологиями из-за незнания или неумения проводить подобные процедуры. Из-за образовавшегося разрыва торговые предприятия имеют факт упущенной выгоды и снижения эффективности. Инновационные разработки позволяют более рационально организовывать управленческие, торгово-технологические, логистические процессы, способствуют грамотному решению транспортных задач и эффективному управлению финансовыми ресурсами.

Основные направления деятельности современного торгового предприятия в области повышения конкурентоспособности

Современные торговые центры предлагают широкие системы скидок и распродажи, предоставляя возможности приобретения товаров категориям граждан с различными покупательскими возможностями.

Для поддержания устойчивого и стабильного положения предприятия и поддержания конкурентоспособности необходимо постоянно повышать квалификацию персонала, способствовать его карьерному росту. При этом повышение квалификации должно, на наш взгляд, носить многоаспектный характер. Часто предприятия выбирают только одно направление: повысить квалификацию сотрудника либо на базе ведущих вузов, либо на базе своего собственного предприятия (крайне редко на базе других предприятий). Чаще всего это происходит вследствие ограниченности финансовых ресурсов. Впоследствии персонал оказывается «недообученным» и не имеет возможности развиваться в правильном направлении. Следует использовать комплексный подход. Для получения теоретических знаний направлять сотрудников следует в ведущие учебные заведения страны, а прикладные аспекты изучать на предприятиях конкурентов, либо на предприятиях зарубежных коллег, или партнеров.

Многие современные торговые предприятия идут на целый ряд ухищрений, позволяющих значительно образом повысить продажи. Это и классическое расположение прилавков с товарами повседневного спроса в самых удаленных уголках торгового зала, применение аромамаркетинга, причем не только в классической его форме (приготовление продуктов питания непосредственно в зале), но и принудительное насыщение воздуха в магазине ароматическими добавками при помощи специального оборудования. Следует отметить, что по заявлениям многих представителей торговой отрасли продажи действительно растут достаточно ощутимыми темпами. Важным фактом в успешности компании играют правильные параметры помещения. Торговые площади, построенные «под заказ», отличаются большей эффективностью и отдачей. Они заранее грамотно спроектированы, что предоставляет возможность расположить товары эффективно и правильно. Если же магазин располагается в помещении, изначально не предназначенном для этих целей, риск неэффективного использования площадей повышается. В этом случае важно своевременно обновлять ассортимент, делать ненавязчивые перестановки, организовывать акции и распродажи, правильно располагать товар и не допускать его отсутствия в какие-то определенные промежутки времени. Товар должен быть правильно оформлен, на каждый товар должны иметься ценники, так как их отсутствие часто приводит к отрицанию покупки со стороны покупателя. Следует отметить, что производители часто со временем снижают качество товара, что приводит к изменениям спроса и снижению лояльности потребителя. Важен также комплекс услуг, оказываемых покупателю при походе в магазин.

Крайне важно использовать в деятельности такое явление, как рефрейминг. Мы предлагаем использовать рефрейминг не только при взаимодействии по линии «потребитель-предприятие», но и по линии «руководитель-подчиненный». Рефрейминг позволяет сформировать необходимый взгляд и мнение человека на ситуацию, товар, услугу. Формирование требуемого мнения позволяет значительно повысить эффективность хозяйственной деятельности предприятия. Рефрейминг применяется многими предприятиями, но не всегда успешно, по причине незнания и непонимания его основ.

На наш взгляд, основными проблемами современных торговых предприятий в области обслуживания покупателей остаются избыточная навязчивость продавцов, некомпетентность, неумение разбираться в товарах, отсутствие правильных цен на ценниках, отсутствие глубокого ассортимента и широкого выбора товаров и сопутствующих услуг, ограниченное число «активных» узлов расчета, вследствие чего покупатели не заходят за небольшими покупками в такой магазин, и др.

Одной из важнейших задач управления предпринимательскими структурами с точки зрения повышения эффективности их работы является разработка новых подходов, методов, механизмов и моделей взаимодействия всех участников бизнес-процессов [5]. Современное торговое предприятие для поддержания и повышения конкурентоспособности должно вести активную деятельность в сети Интернет, по возможности сочетать на территории торгового комплекса торговую и развлекательную составляющие, отвечая мировым гласным и негласным стандартам ведения бизнеса.

Заключение

Предприятию XXI в. важно своевременно учитывать инновационные разработки. Для закрепления конкурентных позиций на рынке крайне важно своевременно грамотно оценивать текущую рыночную ситуацию, а уже на полученной основе формировать стратегию своего дальнейшего развития. При этом следует систематически внедрять в работу инновационные разработки и подходы, позволяющие значительным образом повысить эффективность хозяйственной деятельности предприятия.

Литература

1. Зубова Е. Развлечения надвигаются [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://expert.ru/northwest/2011/26/razvlecheniya-nadvigayutsya/>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 04.04.2012).
2. Напалкова А. Дискаунтер потянулся к дому // Эксперт. – 2011. – № 25 (759). – С. 32–33.
3. Топ-15 российского ритейла [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.liveretail.ru/articles/>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 22.03.2012).
4. Рынок розничных продуктовых сетей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sfera.fm/analitika/tynok-roznichnyh-produktovyh-setey.html>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 21.03.2012).
5. Подлесных В.И. Системный кризис экономики и новый методологический подход к развитию предпринимательских структур // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 5 (75). – С. 127–130.

Чернышева Ольга Владимировна – Санкт-Петербургский торгово-экономический университет, старший преподаватель, ov49@mail.ru

УДК 336.011, 336.71

ИННОВАЦИОННАЯ СРЕДА В ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПОДКОНТРОЛЬНЫХ ГОСУДАРСТВУ БАНКОВ

Т.Я. Красноперова

Рассматривается актуальная проблема инновационного развития банковской системы и роли государства в формировании инновационной среды. Предлагаются пути активизации инновационной деятельности банков.

Ключевые слова: инновации, инновационная среда, банковская система, экономические интересы.

Введение

Инновационное развитие национальной экономики и финансово-кредитной сферы невозможно без создания инновационной среды. Важное значение инновационное развитие приобретает в условиях глобализации, экспансии иностранного капитала в банковскую сферу России и в связи со вступлением в ВТО. Развитие в стране государственно-монополистического капитализма, который характерен для современного состояния национальной экономики и отечественной банковской системы в виде банков с государственным участием в уставном капитале, в определенной мере снижает возможности инновационного развития остальных банков и тормозит формирование инновационной среды. С другой стороны, в условиях жесткой международной конкуренции государство должно иметь стабильную устойчивую базу – системообразующие банки, т.е. процесс этот весьма противоречив, а потому формируется неоднородная инновационная среда в пределах одной отрасли.

Исследования, направленные на рассмотрение сущности инноваций, управления, финансирования и оценки их эффективности на уровне предприятий, нашли отражение в работах отечественных и зарубежных ученых: А.Г. Аганбегяна, И.Т. Балабанова, С.В. Валдайцева, С.Ю. Глазьева, П.Ф. Друкера, Э. Мэнсфилда, А.И. Пригожина, Б. Санто, Р.А. Фатхутдинова, Й. Шумпетера, Ю.В. Яковца и др. В то же время инновационность на уровне банковской системы рассмотрена и представлена недостаточно широко. Цель настоящей работы – выявить возможности формирования и особенности инновационной среды подконтрольных государству банков. Предмет исследования – формирование инновационной среды банковской системы с позиции ее структурированности.

Инновационная среда финансово-кредитных организаций: сущность и основные факторы ее формирования

Инновации в финансово-кредитной сфере направлены на обновление банковских услуг, но связаны с рисками, поэтому при их внедрении возникает противоречие «инновационность/устойчивость». С одной стороны, надежная и стабильная работа субъектов финансово-кредитной сферы, которые находятся в системе хозяйственных связей и обязательств перед клиентами, является основой их успешной дея-

тельности, обслуживаемых ими клиентов и в целом национальной экономики. С другой стороны, субъекты финансово-кредитной сферы вступают в конкурентные отношения, подвергаются воздействию внешних и внутренних факторов, что требует от них инновационного развития, для чего необходимо формирование инновационной среды.

Инновационная среда определяется как сложившееся социально-экономическое, организационно-правовое и политическое положение, обеспечивающее или тормозящее развитие инновационной деятельности, либо как сочетание внутренней и внешней сред участника инновационного процесса, оказывающее прямое либо косвенное влияние на условия инновационной деятельности и ее результат. Внешней средой для финансово-кредитных организаций является надсистема – национальная экономика и ее элементы – экономическая, социальная, технологическая и политическая сферы. Компоненты внутренней среды, влияющие на инновационную деятельность – инновационные инвестиции; звенья административной и инновационной инфраструктуры; участники инновационного процесса; внутрифирменные отношения и связи, образуемые элементами системы субъекта.

Анализ инновационной среды включает оценку внутренней, дает возможность оценить инновационный потенциал финансово-кредитной организации, а анализ инновационной среды в целом позволяет определить ее инновационную позицию. Инновационный потенциал субъекта финансово-кредитной сферы является важнейшим фактором инновационной среды отрасли в целом. Инновационный процесс может осуществляться на уровне финансово-кредитной организации или ее подразделения (внутриорганизационный), финансово-кредитной сферы (внутриотраслевой), национальной экономики (расширенный), что обуславливает наличие трех уровней инновационной среды.

Уровни инновационной среды банковской системы Российской Федерации, роль государства в ее формировании

Внедрение инноваций должно обеспечивать повышение эффективности в сфере ее применения и создание условий для получения дополнительной прибыли, т.е. достижения экономических интересов. Инновационная среда национальной экономики и финансово-кредитной сферы взаимосвязаны, формирование каждой из них обусловлено экономическими интересами и должно способствовать созданию рыночными методами равных условий конкуренции (это не значит – равного уровня конкурентоспособности субъектов).

Фактически характер конкуренции банков с государственным участием в уставном капитале и остальных банков настолько неравноценный, что многие исследователи приходят к выводу о трехуровневости российской банковской системы, а, следовательно, различиям инновационной среды.

А.Г. Пшеничников [1] считает появление «третьего уровня» банковской системы Российской Федерации (РФ) свершившимся фактом, который обусловлен вступлением в силу закона [2], ст. 3. которого определяет Внешэкономбанк как государственную корпорацию и ставит перед ним более широкие цели, чем для других элементов банковской системы второго уровня. Функции банка с особым статусом совпадают в некоторой степени с функциями Центрального банка (ЦБ) РФ, казначейства, инвестиционной финансовой организации. На основании ст. 4. [2] на Внешэкономбанк не распространяются положения закона РФ «О банках и банковской деятельности» [3], регулирующие порядок государственной регистрации кредитных организаций; предоставления информации о деятельности кредитных организаций; обеспечения требований устойчивости и финансовой надежности кредитных организаций, соблюдения иных обязательных требований и нормативов. Для достижения цели Внешэкономбанк – Банк развития на основании закона РФ [2] осуществляет банковские операции, предпринимательскую деятельность, получает прибыль, но не подотчетен Банку России, хотя и имеет банковскую лицензию, что выделяет его из совокупности субъектов второго уровня и нарушает условия формирования инновационной среды, свидетельствует о неравноценности субъектов второго уровня и противоречивости условий конкуренции, а следовательно, неадекватности инновационной среды банковской системы.

А.Г. Анащенко считает, что в российской банковской системе наблюдается несоответствие внутренней организационной структуры банковского сектора, и она может быть трансформирована из двух- в трехуровневую. Второй уровень, по его мнению, представлен федеральными банками, т.е. коммерческими банками с особым статусом; а третий – региональными, причем часть функций ЦБ РФ, в том числе и контрольных, предлагается делегировать госбанкам [4]. С этой точкой зрения трудно согласиться, так как тиражирование контролирующих организаций и контрольных функций будет снижать эффективность инновационной деятельности элементов банковской системы, упорядоченность инновационной среды.

Система должна взаимодействовать с внешней средой как единое целое, в этом ее отличие от других систем. В банковской системе РФ банки с особым статусом и подконтрольные государству банки нарушают иерархичность и целостность системы, самостоятельно взаимодействуя с государством и нарушая иерархичность и целостность системы. Привилегии подконтрольных государству банков снижают степень независимости Банка России при принятии решений по управлению банковской системой и

формированию инновационной среды, которая вследствие привилегий для избранных субъектов становится противоречивой и неэффективной.

По нашему мнению, в РФ сложилась банковская система, в которой второй уровень де-факто государством разделен на несколько подуровней, имеющих разную степень полномочий по использованию ресурсов государства, а, следовательно, возможностей инновационной среды:

- государственные корпорации с особым статусом, имеющие лицензию на совершение банковских операций, но не подотчетные ЦБ РФ (Внешэкономбанк);
- банки с различной степенью участия государства в уставном капитале (Сбербанк, Внешторгбанк, Россельхозбанк и др.);
- банки с участием государственных предприятий в уставном капитале (банк Газпромбанк – Газпром и др.);
- банки, не имеющие в уставном капитале государственных средств, но обслуживающие бюджетные предприятия;
- банки, не имеющие в уставном капитале государственных средств и не обслуживающие бюджетные предприятия.

Банки различных подуровней фактически имеют разную степень подчиненности Банку России, что негативно влияет на возможности инновационного развития, эффективность деятельности банковской системы, ее управляемость как целостной структурой. В России, по мнению Н. Ребельского, «конкурируют между собой банки, представляющие два разных направления развития экономики: государственно-монополистический капитализм и капитализм частнопредпринимательский» [5].

В банковской системе имеются два уровня инновационной среды, инновационные возможности которых значительно различаются, так как большинство банков не имеет достаточной материальной базы для осуществления инновационной деятельности.

Недостаточно окрепшая банковская система России испытывает на себе излишнее давление внутрисистемной конкуренции, вызванное действиями государства по созданию субъектов с особым статусом и нарушающих неустоявшееся равновесие банковской системы. Неадекватность внутренней организационной структуры банковской системы характеру реализации рыночных экономических отношений, обусловленная несоответствием формы и содержания, оказывает негативное воздействие на результаты деятельности банковской системы. Рыночные по форме банковские образования до сих пор управляются в основном административно-командными методами, что тормозит внедрение инноваций.

Государство с находящимися в его ведении мощными коммерческими структурами (Внешэкономбанк, Сбербанк, Внешторгбанк и др.) выступает в качестве главного конкурента в банковской сфере, которую само контролирует. Это искажает условия свободной конкуренции, гарантом которой должно быть государство, и отрицательно влияет на удовлетворение экономических интересов той части банков, которые не имеют доступа к обслуживанию бюджетных счетов. Подобное положение снижает уровень экономической безопасности как отдельных субъектов, так и банковской системы в целом, а также снижает возможности большей части банков развиваться инновационно в соответствии с требованиями времени.

Исследования А.В. Верникова, Е.А. Глушковой, С.С. Бабаева и некоторых других о доле государственного участия в банковской системе России показывают, что на 01.07.2009 г. на 53 банка с государственным участием в уставном капитале (около 4% от всех действующих кредитных учреждений), приходится 57,1% совокупных банковских активов в стране [6]. Для сравнения, до кризиса 1998 г. на долю государственных и квазигосударственных банков приходилось около 31% совокупных активов банков; на 01.01.2001 г. подконтрольным государству банкам принадлежало 35,9% активов банковского сектора; на 01.01.2006 г. – 40,7% [7]. Рост активов банков с государственным участием за 10 лет составил более 187%. Государственный сектор банковской системы растет за счет присоединения новых кредитных учреждений, которые получают доступ к государственным финансам, и за счет приоритетного развития банков с государственным участием, например, в период кризиса. Наиболее динамично растут банки, принадлежащие государству не напрямую, а опосредованно через государственные компании и корпорации. Полагаем, что этот процесс будет продолжаться, так как он отвечает экономическим интересам большего количества носителей, чем только государства. Это объясняется, на наш взгляд, несколькими причинами:

- экономический интерес государства удовлетворяется в совокупности с экономическими интересами государственной корпорации, что увеличивает экономическую целесообразность процесса и инновационный потенциал;
- цели государственных корпораций более четко определены и структурированы, чем собственно государства, поэтому они более активны в создании банков;
- экономические интересы государственных корпораций подкреплены законодательной и финансовой поддержкой государства, что повышает конкурентоспособность подконтрольных им банков;

— появляется возможность посредством инновационной деятельности повысить уровень экономической безопасности хозяйствующего субъекта – собственника банка.

Годовые отчеты банков, подконтрольных государству, показывают, что они развиваются опережающими темпами по сравнению с остальными банками. Благодаря государственной поддержке и в определенной степени монопольному существованию, банки, подконтрольные государству, имеют больший инновационный потенциал и развиваются опережающими темпами по сравнению с остальными банками, вследствие чего их экономические интересы становятся самодовлеющими по отношению к экономическим интересам остальных субъектов.

Поведение банка на рынке финансовых услуг описывается общими законами теории фирмы: выживают в условиях конкуренции хозяйствующие субъекты с меньшими издержками. Государство, поворачивая бюджетные потоки в подконтрольные коммерческие банки, передает денежные средства, а не продает их, в то время как другие банки вынуждены их покупать в виде межбанковских кредитов, в том числе у банков с государственным участием. В результате условия свободной рыночной конкуренции и инновационного развития в банковской сфере нарушаются, а экономические интересы банков удовлетворяются избирательно.

Масштабы рисков банков с государственным участием в капитале возрастают по мере его увеличения. Постепенно, аккумулируя все более значительные государственные средства, банки становятся столь значимыми для банковской и национальной системы, что государство становится заложником вращенных им банков, так как не может допустить их банкротства, опасаясь краха всей системы. Многие исследователи, в частности, эксперты Международного валютного фонда и Мирового банка, выявляют неэффективность государственной собственности в банковском секторе, которая ведет к неустойчивости банковской системы в целом. В свою очередь, помощь государства подконтрольным банкам при появлении проблем снижает экономические показатели национальной экономики. Такое положение было бы невозможным, если бы были созданы условия равноправной конкуренции и адекватная инновационная среда.

Развитые страны с хорошим качеством институтов предпочитают частные банковские институты. Развивающиеся страны с малоэффективными механизмами финансового рынка компенсируют эти недостатки государственным регулированием и участием в капитале, основная цель которого – финансовая поддержка отраслей народного хозяйства и помощь в решении социальных задач, достижение которых ведет к двойственности целей и не всегда связано с получением высокой прибыли.

Несмотря на поставленную государством подконтрольным банкам цель инновационного развития и содействия развитию национальной экономики, эти банки осуществляют деятельность в отрыве от целей национальной экономики и не являются инновационными по содержанию: рост ресурсной базы не привел к кардинальным изменениям в кредитовании предприятий; ставки по кредитам малопривлекательны для предприятий из-за низкой рентабельности, вследствие чего российская промышленность недоинвестирована. Удельный вес частного сектора в активах и капитале банков снижается, фактически наблюдается постепенный возврат к государственной кредитной системе.

Заключение

Таким образом, национальная инновационная система как часть инновационной среды ответственна за формирование внешних условий, благоприятствующих инновационному развитию финансово-кредитной сферы и, в частности, банковской системы. Организация деятельности и управления банками с государственным участием в уставном капитале свидетельствует о привилегированном (близком к монополизированному) их положении, что снижает возможности инновационного развития всех участников рынка финансово-кредитных услуг. В целях активизации инновационного развития необходимо дальнейшее снижение участия государства в капитале коммерческих банков; увеличение доступности кредитов Центрального банка Российской Федерации для всех коммерческих банков; гарантирование государством равных условий конкуренции между всеми банками, соблюдающими установленные Центральным банком Российской Федерации нормативы. Необходимо создание равноправной конкуренции всех субъектов в целях формирования единой эффективной инновационной среды, которая в настоящее время состоит из нескольких уровней внутри одной системы.

Литература

1. Пшеничников А.Г. Финансово-правовые аспекты государственной политики в сфере банковской деятельности в Российской Федерации: Автореф. дис. ... канд. юрид. наук. – Тюмень: Тюм. гос. ун-т, 2010. – 25 с.
2. Закон РФ «О банке развития» ФЗ № 200 от 11.07.2011 г. Ст. 3, 4.
3. Закон РФ «О банках и банковской деятельности» ФЗ № 395-1 от 02.12.1990 г. (ред. от 21.11.2011 г.).
4. Анащенко А.Г. Трансформация экономических отношений банковской сферы на этапе стабилизации хозяйственной системы: Автореф. дис. ... канд. экон. наук. – Тамбов: Тамб. гос. ун-т, 2009. – 24 с.

5. Ребельский Н. Антимонопольное регулирование банковской сферы // Вопросы экономики. – 1995. – № 11. – С. 58–68.
6. Верников А.В. Доля государственного участия в банковской системе России // Деньги и кредит. – 2009. – № 11. – С. 4–14.
7. Ведев А., Данилов Ю., Масленников Н., Моисеев С. Структурная модернизация финансовой системы России // Вопросы экономики. – 2010. – № 5. – С. 26–42.

Красноперова Танзиля Яуфатовна – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат экономических наук, доцент, krasntat@mail.ru

УДК 681.51.015

АЛГОРИТМ УЛУЧШЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СХОДИМОСТИ НЕИЗВЕСТНОЙ ЧАСТОТЫ СИНУСОИДАЛЬНОГО СИГНАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАСКАДНОЙ РЕДУКЦИИ¹

С.В. Арановский, А.А. Бобцов, А.А. Ведяков, С.А. Колюбин, А.А. Пыркин

Рассматривается задача идентификации неизвестной частоты синусоидального сигнала в условиях возмущающего воздействия в измерениях. На базе метода каскадной редукции, предложен алгоритм улучшения параметрической сходимости оценки неизвестной частоты синусоидального сигнала к истинному значению.

Ключевые слова: синусоидальный сигнал, редукция, идентификация, возмущения.

Рассмотрим измеряемый сигнал вида (например, [1, 2])

$$y(t) = \mu(t) + \delta(t), \quad (1)$$

где $\mu(t) = A \sin(\omega t + \phi)$ – неизмеряемый синусоидальный сигнал, $A > 0$, $\omega > 0$, ϕ – неизвестные постоянные параметры; $\delta(t)$ – неизмеряемое возмущение. Ставится задача синтеза алгоритма идентификации неизвестного параметра ω – частоты синусоидального сигнала $\mu(t)$.

Базируясь на [1, 2], осуществим параметризацию модели (1) следующим образом:

$$p^2 y(t) = \theta \mu(t) + p^2 \delta(t), \quad (2)$$

$$\frac{\lambda^2 p^2}{(p + \lambda)^2} y(t) = \theta \frac{\lambda^2}{(p + \lambda)^2} \mu(t) + \frac{\lambda^2 p^2}{(p + \lambda)^2} \delta(t) = \theta \frac{\lambda^2}{(p + \lambda)^2} y(t) + \frac{\lambda^2 p^2 - \theta \lambda^2}{(p + \lambda)^2} \delta(t), \quad (3)$$

где $p = d/dt$, $\lambda > 0$ – некоторый выбираемый при синтезе коэффициент, а $\theta = -\omega^2$ – неизвестный параметр, подлежащий идентификации.

Введем новые обозначения:

$$z(t) = \frac{\lambda^2 p^2}{(p + \lambda)^2} y(t), \quad \zeta(t) = \frac{\lambda^2}{(p + \lambda)^2} y(t), \quad \bar{\eta}(t) = \frac{\lambda^2 p^2 - \theta \lambda^2}{(p + \lambda)^2} \delta(t),$$

тогда, используя преобразования (2), (3), для модели (1) имеем

$$z(t) = \theta \zeta(t) + \eta(t), \quad (4)$$

где $\eta(t) = \bar{\eta}(t) + \varepsilon(t)$, $\varepsilon(t)$ – экспоненциально затухающее слагаемое, обусловленное ненулевыми начальными условиями. Аналогично работам [1, 2] можно воспользоваться алгоритмом идентификации вида

$$\dot{\hat{\theta}}(t) = -k \hat{\theta}^2(t) + k \zeta(t) z(t), \quad (5)$$

где $\hat{\theta}(t)$ – оценка параметра θ , а $k > 0$ – некоторый коэффициент, либо задаваемый при синтезе, либо настраиваемый в процессе работы. Однако такой подход не обеспечивает парирования возмущения $\eta(t)$. Рассмотрим новую схему идентификации, развивающую алгоритм (5). Для этого проанализируем поведение разности параметра θ и его оценки $\hat{\theta}(t)$, т.е.

$$\tilde{\theta}(t) = \theta - \hat{\theta}(t). \quad (6)$$

Дифференцируя (6), с учетом (4) и (5) получаем

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\theta}}(t) &= \dot{\theta} - \dot{\hat{\theta}}(t) = k \hat{\theta}^2(t) - k \zeta(t) z(t) = k \hat{\theta}^2(t) - k \zeta(t) (\zeta(t) \theta + \eta(t)) = \\ &= -k \zeta^2(t) (\theta - \hat{\theta}(t)) - k \zeta(t) \eta(t) = -k \zeta^2(t) \tilde{\theta}(t) - k \zeta(t) \eta(t). \end{aligned} \quad (7)$$

Легко показать, что при $\delta(t) \equiv 0$ дифференциальное уравнение (7) асимптотически устойчиво и $\tilde{\theta}(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$. Если же система подвержена действию возмущения, то, в общем случае, $\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{\theta}(t) \neq \theta$. Тогда идеальный алгоритм идентификации может иметь вид

$$\dot{\hat{\theta}}^*(t) = -k \hat{\theta}^* \zeta^2(t) + k \zeta(t) z(t) - k \zeta(t) \eta(t).$$

Тогда

¹ Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственный контракт № 16.740.11.0553).

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\theta}}^*(t) &= \dot{\theta} - \dot{\hat{\theta}}^*(t) = k\hat{\theta}^*\zeta^2(t) - k\zeta(t)z(t) + k\zeta(t)\eta(t) = k\hat{\theta}^*\zeta^2(t) - k\zeta(t)(\theta\zeta(t) + \eta(t)) + k\zeta(t)\eta(t) = \\ &= k\hat{\theta}^*\zeta^2(t) - k\theta\zeta^2(t) = -k\tilde{\theta}^*(t)\zeta^2(t),\end{aligned}$$

откуда следует, что при выполнении условия предельной интегральной невожденности сигнала $\zeta^2(t)$ обеспечивается $\lim_{t \rightarrow \infty} |\tilde{\theta}^*(t)| = 0$. Отметим, что в силу гармонической природы сигнала $\mu(t)$ это условие выполняется за исключением вырожденных случаев (например, $\delta(t) = -\mu(t)$). Предложенная схема не может быть реализована в явном виде, так как сигнал $\zeta(t)\eta(t)$ не измеряется. Предлагается следующая реальная схема идентификации, парирующая неопределенность $\zeta(t)\eta(t)$:

$$\dot{\hat{\theta}}_r(t) = -k\hat{\theta}_r\zeta^2(t) + k\zeta^2(t)\phi_1(t)/\phi_2(t),$$

где $\phi_1(t) = \int_0^t z(\tau)\zeta(\tau)d\tau$ и $\phi_2(t) = \int_0^t \zeta^2(\tau)d\tau$. Обоснованием использования такой схемы является метод каскадной редукции [3]. Преобразуем (4), следуя данному методу. Для этого последовательно умножим (4) на $\zeta(t)$ и проинтегрируем полученное уравнение, т.е.

$$z(t)\zeta(t) = \theta\zeta^2(t) + \eta(t)\zeta(t), \quad \int_0^t z(\tau)\zeta(\tau)d\tau = \theta \int_0^t \zeta^2(\tau)d\tau + \int_0^t \eta(\tau)\zeta(\tau)d\tau.$$

Введем обозначения $\phi_1(t) = \int_0^t z(\tau)\zeta(\tau)d\tau$, $\phi_2(t) = \int_0^t \zeta^2(\tau)d\tau$ и $\phi_3(t) = \int_0^t \eta(\tau)\zeta(\tau)d\tau$ и последовательно сначала разделим на $\phi_2(t)$, а затем продифференцируем последнее соотношение. Тогда получаем

$$\dot{\phi}_1\phi_2^{-1} - \phi_1\dot{\phi}_2\phi_2^{-2} = \dot{\phi}_3\phi_2^{-1} - \phi_3\dot{\phi}_2\phi_2^{-2} \quad \text{или} \quad \dot{\phi}_3 = \phi_3\dot{\phi}_2\phi_2^{-1} + \dot{\phi}_1 - \phi_1\dot{\phi}_2\phi_2^{-1}.$$

Так как $\dot{\phi}_1 = z(t)\zeta(t)$, $\dot{\phi}_2 = \zeta^2(t)$ и $\dot{\phi}_3 = \zeta(t)\eta(t)$, то $\zeta(t)\eta(t) = z(t)\zeta(t) + \phi_3\zeta^2\phi_2^{-1} - \phi_1\zeta^2\phi_2^{-1}$.

Будем полагать, что слагаемое $\phi_1\dot{\phi}_2\phi_2^{-1}$ при $t \rightarrow \infty$ влияет на точность оценки параметра θ больше, чем компонента $\phi_3\dot{\phi}_2\phi_2^{-1}$. Тогда для парирования неопределенности $\zeta(t)\eta(t)$ будем использовать выражение

$$\zeta(t)\eta(t) = z(t)\zeta(t) - \phi_1\zeta^2\phi_2^{-1},$$

откуда следует алгоритм идентификации вида

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\theta}}_r(t) &= -k\hat{\theta}_r\zeta^2(t) + k\zeta^2(t)\theta = -k\hat{\theta}_r\zeta^2(t) + k\zeta(t)(z(t) - \eta(t)) = -k\hat{\theta}_r\zeta^2(t) + k\zeta(t)z(t) - k\zeta(t)\eta(t) = \\ &= -k\hat{\theta}_r\zeta^2(t) + k\zeta^2(t)\phi_1(t)/\phi_2(t).\end{aligned}\tag{8}$$

Для иллюстрации работоспособности предлагаемой схемы идентификации вида (8) и для сравнения ее со стандартным подходом (5) приведем результаты компьютерного моделирования (рисунок).

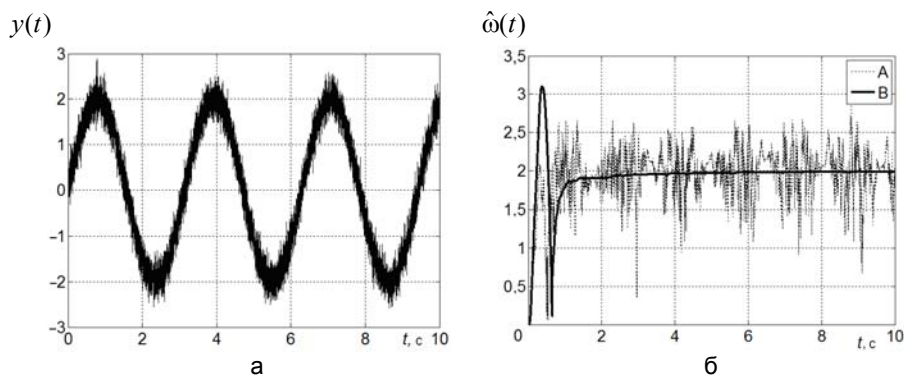


Рисунок. Результаты численного моделирования алгоритма оценивания частоты зашумленного сигнала: сигнал $y(t) = 2 \sin(2t) + \delta(t)$ (а); оценка частоты при $\lambda = 10$, $k = 10$ (б): **A** – алгоритм (5), **B** – алгоритм (8)

1. Aranovskiy S., Bobtsov A., Kremlev A., Nikolaev N., Slita O. Identification of frequency of biased harmonic signal // European Journal of Control. – 2010. – № 2. – P. 129–139.
2. Бобцов А.А., Ефимов Д.В., Пыркин А.А., Золгадри А. Алгоритм адаптивного оценивания частоты смещенного синусоидального сигнала с аддитивной нерегулярной составляющей // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 2. – С. 16–21.

3. Арановский С.В., Бобцов А.А., Пыркин А.А. Каскадная редукция в задачах идентификации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 3. – С. 149–150.

Арановский Станислав Владимирович – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, s.aranovskiy@gmail.com

Бобцов Алексей Алексеевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, декан, bobtsov@mail.ifmo.ru

Ведяков Алексей Алексеевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, магистрант, vedyakov@gmail.com

Колубин Сергей Алексеевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, s.kolyubin@gmail.com

Пыркин Антон Александрович – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, ppaannddaa@mail.ru

УДК 681.324

ОЦЕНКА СНИЖЕНИЯ ТРУДОЕМКОСТИ ПОДГОТОВКИ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CALS-ТЕХНОЛОГИИ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ

И.О. Жаринов, О.О. Жаринов, Р.А. Шек-Иовсепянц, В.Д. Суслев

Рассматривается процедура оценивания трудоемкости подготовки конструкторской документации при разработке приборов и устройств с использованием CALS-технологии. Определена зависимость снижения трудоемкости подготовки документации от числа документов на изделие, подготавливаемых электронным способом с использованием технологии электронного документооборота.

Ключевые слова: трудоемкость, разработка документации, электронный документооборот.

Деятельность современного инженера-конструктора радиоэлектронного оборудования сопряжена с необходимостью подготовки большого объема конструкторской документации. Как было показано в работе [1], при использовании стандартов группы STEP (Standard for the Exchange of Product) на основе CALS-технологии (Continuous Acquisition and Life-cycle Support) электронного документооборота, разнообразные программные средства автоматизации схмотехнического и конструкторского этапов проектирования могут быть объединены в единую систему автоматизированного проектирования (САПР), используемую в составе автоматизированных рабочих мест (АРМ) разработчиков.

В этом случае при внесении единичных изменений в состав одного проектного документа (чертежа, схемы), связанные с ним другие электронные проектные документы (спецификации, чертежи деталей, перечни элементов, ведомости покупных изделий и пр.) корректируются автоматически. Очевидным эффектом от внедрения такой интегрированной САПР является снижение трудоемкости этапа разработки конструкторской документации и, как следствие, удешевление проведения опытно-конструкторской работы в целом.

Методика оценки эффекта от автоматизации процедур разработки документации сложного изделия сводится к следующему [2].

Суммарная трудоемкость подготовки исходных данных для всего процесса проектирования изделия определяется как

$$\tau_{\text{подг}} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=0, i \neq j}^m M_{ij} K_n (1 - k_i) k_j, \quad (1)$$

где m – число проектных задач; M_{ij} – объем электронных данных, передаваемых между приложениями интегрированной САПР из i -ой проектной задачи в j -ю; K_n – коэффициент трудоемкости подготовки единицы объема информации; k_i – булева переменная автоматизации проектирования (для документов, подготовку которых целесообразно выполнять вручную, $k_i, k_j = 0$, иначе, $k_i, k_j = 1$).

Анализ (1) показывает, что трудоемкость подготовки проектных данных для j -ой задачи уменьшается, если решение i -ой проектной задачи, результаты которой используются в качестве исходных данных j -ой задачи, автоматизируется электронным способом. При автоматизации i -ой проектной задачи результаты ее решения уже хранятся в памяти ЭВМ АРМ, и не требуется их повторная переподготовка.

Аналогично, в предположении о пренебрежимо малом времени исполнения автоматической коррекции связанных документов суммарная трудоемкость решения «ручной» группы задач по подготовке документации на изделие составляет

$$\tau_{\text{реш}} = \sum_{i=1}^m \tau_{\text{реш}_i} (1 - k_i),$$

где $\tau_{\text{реш}_i}$ – трудоемкость ручного решения i -ой проектной задачи. Таким образом, трудоемкость формирования проектной документации на изделие оценивается как

$$\tau_{\text{форм}} = \sum_{i=1}^{M^*} \sum_{j=1}^m \tau_{\text{форм}_{ij}} (1 - k_j),$$

где M^* – число проектных документов; $\tau_{\text{форм}_{ij}}$ – трудоемкость формирования той части i -го документа, которая зависит от результатов решения j -ой проектной задачи. Аналогично трудоемкость внесения изменений в проектную документацию оценивается как

$$\tau_{\text{изм}} = \sum_{i=1}^{M^*} \sum_{j=1}^m \tau_{\text{изм}_{ij}} \chi_j (1 - k_j),$$

где $\tau_{\text{изм}_{ij}}$ – трудоемкость внесения изменений в i -й документ при появлении изменений в результате решения j -ой проектной задачи; χ_j – число появлений изменений в результате решения j -ой проектной задачи.

Общая задача организации процесса разработки документации на изделие с использованием интегрированной САПР является оптимизационной и имеет вид

$$\min_{k_1, k_2, \dots, k_k} \{ \tau_{\text{проект}} \} = \min_{k_1, k_2, \dots, k_k} \left\{ \sum_{j=1}^m \sum_{i=0, i \neq j}^m M_{ij} K_n (1 - k_i) k_j + \right. \\ \left. + \sum_{i=1}^m \tau_{\text{реш}_i} (1 - k_i) + \sum_{i=1}^{M^*} \sum_{j=1}^m \tau_{\text{форм}_{ij}} (1 - k_j) + \sum_{i=1}^{M^*} \sum_{j=1}^m \tau_{\text{изм}_{ij}} \chi_j (1 - k_j) \right\} \leq \Delta_{\text{НИОКР}}^{\tau_{\text{проект}}}. \quad (2)$$

Задача (2) является билинейной с булевыми переменными k_i, k_j . Применяемые при ее решении методы оптимизации (в частности, использованный авторами метод ветвей и границ [3]) позволяют за допустимое время решать такие задачи при размерности $m > 50$ и $M^* > 50$.

Экспериментально полученная зависимость уровня сокращения трудоемкости выпуска конструкторской документации при разработке изделий бортовой авионики в Опытно-конструкторском бюро (ОКБ) «Электроавтоматика» от количества выпускаемых на одно изделие автоматизированным способом связанных электронных документов приведена на рисунке.

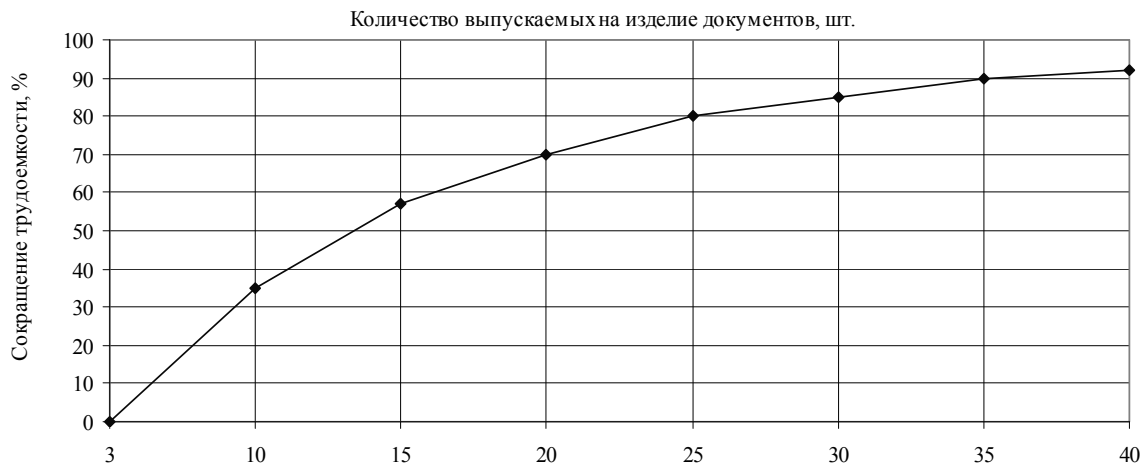


Рисунок. Зависимость уровня сокращения трудоемкости выпуска конструкторской документации при разработке технического изделия от количества выпускаемых на изделие автоматизированным способом связанных электронных документов

Анализ рисунка показывает, что в случае разработки изделия, в состав документации на которое входит более 40 электронных связанных между собой проектных документов (чертежей), суммарная трудоемкость их разработки снижается практически вдвое за счет существующей в них взаимосвязи и избыточности.

Опыт практической работы ОКБ «Электроавтоматика» показывает, что объем проектной документации, достаточной для изготовления изделия в производстве, в среднем составляет 135 документов на одно изделие. В окрестностях этого значения кривая сокращения трудоемкости достигает уровня 100%. В связи с этим внедрение интегрированной САПР для разработки современных электронных приборов является экономически обоснованным и целесообразным.

1. Гатчин Ю.А., Жаринов И.О., Жаринов О.О. Архитектура программного обеспечения автоматизированного рабочего места разработчика бортового авиационного оборудования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 2 (78). – С. 140–141.

2. Гатчин Ю.А., Жаринов И.О. Основы проектирования вычислительных систем интегрированной модульной авионики: монография. – М.: Машиностроение, 2010. – 224 с.
3. Гайкович А.И. Основы теории проектирования сложных технических систем. – СПб: НИЦ «МОРИНТЕХ», 2001. – 432 с.

Жаринов Игорь Олегович – СПб ОКБ «Электроавтоматика» имени П. А. Ефимова, доктор технических наук, доцент, igor_gabota@pisem.net

Жаринов Олег Олегович – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кандидат технических наук, доцент, zharinov@hotmail.ru

Шек-Иовсепяц Рубен Ашотович – СПб ОКБ «Электроавтоматика» имени П. А. Ефимова, доктор технических наук, профессор, главный конструктор, postmaster@elavt.spb.ru

Суслов Владимир Дмитриевич – СПб ОКБ «Электроавтоматика» имени П. А. Ефимова, руководитель экспертного совета, postmaster@elavt.spb.ru

УДК 004.428

КРОССПЛАТФОРМЕННЫЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ

Э.Э. Ошурок, К.В. Ежова

Предложена реализация кроссплатформенного инструментария, предназначенного для разработки программных продуктов на языках программирования семейства C/C++ под настольные и мобильные платформы различного назначения. Особенностью инструментария является возможность переносить программы между платформами без изменения исходного кода. Рассмотрена структура инструментария, раскрыт обобщенный алгоритм реализации переносимости приложений при сохранении высокой производительности. Приведены возможные направления дальнейшего использования инструментария.

Ключевые слова: кроссплатформенность, переносимость, платформа, кросс-компилятор, инструментарий разработки.

На сегодняшний день многие пользователи переходят на мобильные платформы из-за их популярности и удобства использования. По этой причине разработчикам программного обеспечения приходится создавать все новые программы. При этом используются существующие средства разработки, которые не всегда позволяют написать код, переносимый на различные платформы без потерь производительности и скорости работы. В последнее время широко используются так называемые кросс-компиляторы, способные производить на одной и той же платформе код для отличных от нее платформ. Предварительная сборка такого кросс-компилятора требует больших затрат времени и ресурсов, а работа с ним не гарантирует абсолютно успешного результата, так как готовое программное обеспечение может нуждаться в изменениях [1].

Если не акцентировать внимание именно на платформах для мобильных устройств, то и для настольных рабочих станций широчайший круг разрабатываемых продуктов создается строго под определенные операционные системы, ввиду чего пользователю приходится иногда отказываться от привычного ему рабочего окружения ради программного продукта, который ему необходим на данный момент для решения конкретной задачи.

В настоящее время существуют такие средства разработки программ, как язык Java, с помощью которого возможно создать программный продукт, переносимый между платформами без необходимых дополнительных изменений исходного кода. Однако программы, реализованные на языке Java, требуют довольно много ресурсов для своей работы [2].

С появлением кроссплатформенного инструментария Qt стало возможным создавать переносимые программные продукты на языках семейства C/C++, Java или Python [3]. Основным недостатком использования Qt является размер готового программного продукта, что в ряде случаев неприемлемо. Кроме того, программы, разработанные с использованием перечисленных языков программирования, не всегда могут работать под управлением более ранних версий операционных систем.

Проведя анализ предложенных решений для создания кроссплатформенных приложений, можно предложить два основных варианта:

1. создание программных продуктов на языке Java с уменьшением производительности работы;
2. создание программ с использованием инструментария Qt в связке с языками Java или C/C++.

Второй вариант в настоящее время является более предпочтительным.

Альтернативой использования уже ставших стандартными методов решения рассматриваемой проблемы может стать создание специализированного прикладного интерфейса программирования, используя который в дальнейшем, можно будет создавать программные продукты, переносимые между различными мобильными платформами без потерь производительности, дополнительных изменений кода и увеличения размера. Кроме этого, такие программы могли бы функционировать и на платформах для настольных компьютеров [4].

Разрабатываемый проект, в первую очередь, представляет собой необходимый инструментарий, который позволит создавать кроссплатформенные программные продукты различного назначения и может широко применяться в различных областях науки, где используются и разрабатываются программ-

ные продукты для математического моделирования реальных физических процессов, создаются наглядные модели и проводятся обработка и анализ различных результатов измерения. Такие программные продукты могут быть собраны для различных платформ, что снимает ограничения на использование различных операционных систем и привязку к технике определенной марки.

Главное отличие разрабатываемого проекта от проанализированных продуктов состоит в том, что полученные с его помощью программные продукты имеют меньший размер, могут работать также на более ранних версиях операционных систем и, таким образом, минимально зависят от функций платформы, под которой они работают.

Инструментарий работает со встроенными типами определения данных языков семейства C/C++, для использования функций из инструментария их достаточно вызвать в коде будущей программы. В инструментарии отсутствуют функции, которые можно реализовать и без него. Инструментарий представляет собой базовую систему, с использованием которой реализованы различные дополнения, в частности, и для решения узкоспециализированных задач. Общая структура инструментария представлена в виде модульной схемы на рис. 1.

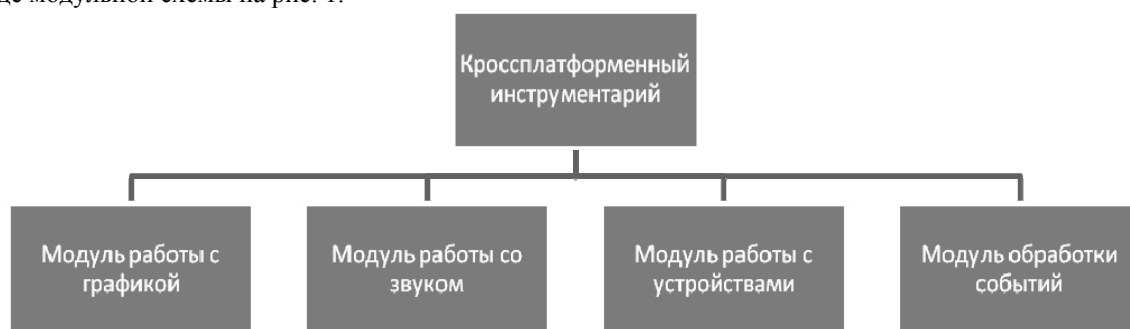


Рис. 1. Общая структура инструментария

Инструментарий представляет собой несколько модулей, каждый из которых выполняет отдельную задачу. Например, модуль работы с графикой позволяет взаимодействовать с графической подсистемой. Таким образом, можно создавать программы, визуализирующие какие-либо физические явления или обработку изображения. Реализация возможности работы с трехмерной графикой также является важным звеном проекта.

Модуль работы со звуком позволяет, используя возможности звуковой подсистемы, генерировать звук, что может быть использовано в программах синтеза речи. Для передачи данных между устройствами ввода/вывода предусмотрен отдельный модуль. Отдельно реализовано событийное программирование, используя которое программа может реагировать на изменения состояния оборудования.

На рис. 2 более подробно представлен модуль работы с графикой. Модуль делится на несколько узкоспециализированных частей, каждая из которых отвечает за реализацию графического интерфейса пользователя, моделирование оптических объектов, таких как линзы, призмы, зеркала. Имеется модуль для обработки изображений и реализации трехмерной графики.

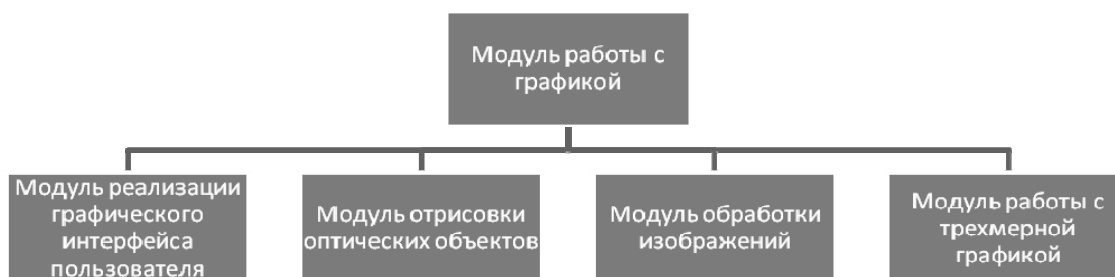


Рис. 2. Структура модуля работы с графикой

Таким образом, для написания узкоспециализированной программы, работающей, например, с обработкой изображения, необходимо воспользоваться только одним модулем, не прибегая к тем инструментам, которые в данном случае не нужны.

Для того чтобы программные продукты, созданные с использованием разработанного инструментария, были переносимы, реализовано несколько версий, каждая из которых создавалась для определенной платформы. Такой подход дает хорошие результаты с точки зрения производительности за счет того, что каждая версия инструментария для реализации тех или иных возможностей использует встроенные функции самой платформы.

Авторы считают, что использование предлагаемой разработки позволит создавать программное обеспечение, работающее на различных платформах с минимальными требованиями и с высокой произ-

водительностью. Проект может быть использован при создании библиотеки, предназначенной для визуализации элементов оптических систем различного назначения. Такие элементы могут использоваться для создания на их базе конечных программных продуктов, моделирующих оптические системы.

Результаты работы представлены на международном конкурсе студенческих инновационных проектов ИТФон и получили высокую оценку жюри в номинации «Лучший проект в области информационно-коммуникационных технологий».

1. Гриффитс А. GСС. Настольная книга пользователей, программистов и системных администраторов. – Киев: «ТИД ДС». – 2004. – 624 с.
2. Ноутон П., Шилдт Г. Java 2. Полный справочник. – Спб: БХВ-Петербург, 2008. – 1102 с.
3. Бланшет Ж., Саммерфилд М. Qt 4. Программирование GUI на C++. – М: – Кудиц-Пресс, 2007. – 641 с.
4. Ахо А., Лам М., Сети Р., Ульман Д. Компиляторы: принципы, технологии и инструментарий. – 2-е изд. – Киев: «ИД-Вильямс», 2011. – 1184 с.

Ошурок Эдуард Эдуардович – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, creddy@inbox.ru

Ежова Ксения Викторовна – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, EzhovaKV@aco.ifmo.ru

УДК 681:378

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПРИБОРА КОНТРОЛЯ МАРОК ЦИФРОВОГО АВТОКОЛЛИМАТОРА

А.А. Литвинович

Рассматривается создание алгоритма автоматизации операций контроля характеристик марок для цифрового автоколлиматора, на основе созданного алгоритма разработано программное обеспечение для прибора контроля.

Ключевые слова: цифровой автоколлиматор, контроль марок.

Марки предназначены для новых цифровых автоколлиматоров, разрабатываемых в ОАО «ЛОМО», у которых унифицированы алгоритм обработки изображений, методика измерения углов, электронные составляющие (включая ПЗС-матрицу). Определение позиции марки происходит путем имитации сканирования щелью, размер которой определяется размером пикселя матрицы цифрового коллиматора, т.е. каждая строка (либо столбец) изображения с матрицы суммируется в массиве-накопителе, и определение координат марки производится по данным одномерного массива для каждой координаты. После имитации сканирования изображения поочередно в двух направлениях оба массива-накопителя содержат в себе распределение нормированного коэффициента пропуска (НКО). Для правильной интерпретации данных цифровым коллиматором распределение НКО марки должно иметь форму равнобедренного треугольника, либо равнобокой трапеции с верхним основанием минимального размера, что должно обеспечиваться конфигурацией марки.

Существует три типоразмера марок (100, 250, 1000 мкм) для трех версий цифровых коллиматоров. На марки (и на содержащиеся в них структуры, в частности) заданы определенные требования, которые необходимо контролировать в автоматизированном режиме. Соответственно для контролеров ОТК нужно создать прибор контроля и программное обеспечение (ПО), которое максимально упростит процесс контроля характеристик изготовленных марок. В состав прибора контроля входят микроскоп ПОЛАМ Р-312 со светодиодным осветителем, цифровая камера EVS VAC-135-USB, устройство позиционирования марки и персональный компьютер; из дополнительной оснастки – объект-микрометр, окуляр-микрометр МОВ-1-16^х. Алгоритм обработки изображения марки, лежащий в основе ПО, должен строиться по модульному принципу и включать в себя набор фильтров, которые могут использоваться при необходимости. В качестве предобработки могут применяться инверсия изображения (при контроле фотошаблонов, так как те имеют обращенные цвета) и учет фона. Изображение марки обрабатывается путем имитации сканирования, в результате чего получаются два массива с распределениями НКО. Затем производится определение коэффициента асимметрии (КА), положения центров тяжести (ЦТ) и медиан по распределениям, а также производится расчет области существования (ОС) и привязка положений ЦТ и медиан к ее центру.

Из требований чертежа оптическая плотность темного фона должна быть не ниже 2,5, что при пересчете на НКО равняется 0,032 и менее, следовательно, это значение не может быть верно измерено с помощью микроскопа и телекамеры, собственные шумы которой находятся на уровне 0,03–0,11 от насыщения матрицы при отсутствии какой-либо засветки. Исходя из этого, для измерения оптической плотности необходимо использовать микрофотометр, а для учета фона воспользоваться операцией сегментации по нижнему порогу [Л]:

$$seg(x,t) = \begin{cases} 0, & \text{при } x \leq t, \\ x, & \text{при } x > t, \end{cases}$$

где x – интенсивность пикселя; t – пороговое значение интенсивности, ниже которого интенсивность можно считать нулевой. Сегментация проводится над каждым пикселем захватываемого изображения, в результате чего значения интенсивности фона исключаются из дальнейших вычислений. Следующий этап после предобработки – имитация сканирования. Эту операцию по направлению одной оси можно описать следующей формулой:

$$R_i = \sum_{k=0}^N I_{i,k},$$

где $I_{i,k}$ – исходное изображение, рассматриваемое как массив; i, k – порядковые номера элементов массивов; N – количество элементов в строке (столбце) исходного изображения; R – результирующий массив, который впоследствии нормируется и его можно считать распределением НКП, дальнейшая работа по определению характеристик проводится с ним.

ОС определяется последовательностью ненулевых элементов распределения НКП, исходя из того, что на одном кадре, полученном на приборе контроля, будет присутствовать только один объект. Такое решение позволяет упростить алгоритм и облегчить расчет ОС, а также отсеивать марки с прокольными пятнами, располагающимися вблизи структуры.

Расчет центра тяжести распределения НКП производится по формуле

$$C = \frac{\sum_{i=0}^N R_i \cdot i}{\sum_{i=0}^N R_i}.$$

Если рассматривать распределение НКП как распределение случайной величины, то к нему можно применить математический аппарат теории вероятности, в частности, медиану распределения случайной величины. В данном случае медиана определяется с помощью циклического прохода по массиву, содержащему распределение НКП, и расчета значения разностей площадей по формуле

$$M_k = \left| \sum_{i=0}^{N-k} R_i - \sum_{i=N-k}^N R_i \right|.$$

Положение медианы распределения будет определяться порядковым номером k , минимального элемента M_k . Численное значение КА распределения НКП в дискретном виде можно рассчитать как

$$K = \sum_{i=0}^{N-1} (R_i - R_{i+1}).$$

При значении КА, не превышающем 0,25, распределение можно считать симметричным. Благодаря привязке ЦТ и медианы к центру ОС их координаты становятся смещениями, следовательно, они также могут характеризовать симметрию распределения НКП, а также позволяют производить сравнительную оценку. Идеальным результатом будут значения, равные нулю, на практике центры расходятся на небольшие величины, которыми можно пренебречь. При наличии деформации в структуре марки смещения ЦТ и медианы возрастают, что может говорить о непригодности марки для использования.

Разработанное ПО позволяет как производить захват изображения с камеры, так и загружать заранее полученные изображения. Предусмотрен специальный функционал, позволяющий проводить градуировку осей по изображению объект-микрометра в автоматизированном режиме. Градуировка производится перед каждой отдельной серией измерений и при смене объективов. В качестве дополнительных функций введены: возможности отображения сетки поверх захватываемого изображения, что помогает правильно позиционировать марку; пакетная обработка заранее полученных изображений; создание файлов-отчетов с настраиваемым видом, что позволяет свести к минимуму рутинные операции подготовки протоколов контроля ОТК.

ПО было разработано на Java (язык и платформа) с использованием графической библиотеки из Processing (чтение изображений и визуализация данных), набором библиотек GSVideo (захват изображений с камеры) и библиотеки создания пользовательского интерфейса Swing. Прибор контроля и разработанное для него программное обеспечение внедрены в процесс производства марок в ОАО «ЛОМО».

[Л]. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.

Литвинович Александр Александрович – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, litvinovich.alexander@gmail.com

УДК 629.7

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ
АВТОНОМНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

И.Э.Комарова

Рассмотрены вопросы реализации различных схемных решений навигационных систем.

Ключевые слова: навигация, система, информация, гироскоп, акселерометр.

При современном уровне развития систем управления космическими комплексами (КК) и аппаратами (КА) всех уровней задачи навигации на борту в принципе полностью решаемы по первичной навигационной информации (ПНИ), получаемой по радиоканалам связи от наземных комплексов управления и спутниковых навигационных систем (НС). Полностью автономные навигационные системы (АНС) могут применяться в качестве резервных для повышения надежности и помехоустойчивости на КК специального назначения. Практика эксплуатации искусственных спутников Земли показала, что с точки зрения управления их движением на пассивных и активных участках полета наиболее перспективными являются бортовые системы ориентации, в состав которых в качестве основного компонента входят классические инерциальные системы (ИС), решающие задачи навигации.

При синтезе ИС навигации для активных участков орбитального движения должны быть соблюдены несколько условий функционирования системы: хранение ориентации базовых осей координат, в которой должны производиться измерения сил (реализуется использованием гироскопов); измерение составляющих кажущегося ускорения в этих базовых осях (удовлетворяется акселерометрами); наличие информации о распределении напряженности гравитационного поля Земли (осуществляется аналитически в спецпроцессоре); возможность двойного интегрирования (необходимым условием являются начальное положение и начальная скорость).

Реализация на практике достоинств бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) связана с решением двух основных задач: созданием высокоточных чувствительных элементов (ЧЭ) с увеличенным динамическим диапазоном измерений и дальнейшей миниатюризацией бортового вычислительного комплекса (БВК) при одновременном повышении скорости и объема вычислений при обработке ПНИ. Физическая реализация БИНС предусматривает три возможных конструктивных решения БИНС: на основе трех одноосных гиростабилизаторов; с применением шести пространственно распределенных акселерометров; комбинацией трех датчиков угловой скорости и трех акселерометров [1].

Первое из перечисленных решений позволяет ощутимо снизить степень влияющих на ЧЭ НС возмущений, но основным препятствием к его широкому практическому применению являются значительные весогабаритные характеристики, необходимость реализации высокоточной начальной ориентации НС на подвижном основании и рост инструментальных ошибок всей измерительной системы при маневрировании КА. Учитывая, что установленные на подвижных носителях шесть пространственно распределенных акселерометров не должны подвергаться перегрузкам более 20 g, а предельно достижимая точность измерения кажущегося ускорения современными моделями находится в диапазоне 10^{-4} – 10^{-7} g при обязательной для осуществления измерения вектора абсолютной угловой скорости 10^{-11} – 10^{-12} g, можно сделать вывод о практической нереализуемости при построении БИНС поставленной задачи в случае указанной конструктивной схемы.

Несомненное достоинство третьей схемы построения НС заключается в исключении погрешностей, вызванных уходами одноосных гиростабилизаторов, и применении современных высокочувствительных элементов, работа которых базируется на различных физических принципах (микромеханика, микроэлектроника, оптоэлектроника, лазерная техника и др.). Наибольшие успехи в создании АНС достигнуты в результате применения в них динамически настраиваемых гироскопов и гироскопов с динамическим подвесом ротора, несмотря на возникающие в этом случае большие дрейфы и ухода. Перспективной реализацией НС можно считать использование лазерных, а с появлением оптических волокон, стойких к воздействию частиц высоких энергий, – волоконно-оптических гироскопов. Сфера применения БИНС ограничена необходимостью аналитического моделирования опорной системы координат и преобразования сигналов гироскопов и акселерометров, отсутствием совершенных методов начальной ориентации и калибровки системы, а также дополнительными трудностями калибровки ЧЭ в связи с изменением ориентации их осей чувствительности по отношению к направлению вектора силы тяжести.

Использование в измерительном комплексе на базе гиростабилизированной платформы (ГСП) НС, построенной по геометрической, аналитической или наиболее распространенной на сегодня полуаналитической схеме (горизонтальные и пространственные инерциальные НС), предусматривает повышение на 2–3 порядка точности измерения параметров в широком диапазоне для ЧЭ, размещенных на ГСП, и гарантированное решение навигационных задач в условиях больших перегрузок. Погрешности гироскопов компенсируются по результатам наземных калибровок, а динамический дрейф ГСП возмещается в процессе движения путем использования дополнительной ПНИ от различных датчиков и систем, что предполагает применение в БВК высокоточных алгоритмов оценивания, позволяющих использовать для управления не только скорости, но и оценки угловых отклонений ГСП и дрейфа гироскопов, что приво-

дит к повышению точности НС и компенсации погрешностей при исчезновении внешнего источника информации.

[Л]. Соколов С.В., Погорелов В.А. Основы синтеза многоструктурных бесплатформенных навигационных систем. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 182 с.

Комарова Ирина Эриковна – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, ppaannddaa@mail.ru

УДК 535.65, 628.9

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДОВ

А.Д. Вакуленко, Е.В. Горбунова, В.С. Перетягин, А.Н. Чертов

Приведены результаты работ по созданию автоматизированного аппаратно-программного комплекса для контроля и аттестации излучающих диодов, обеспечивающего одновременное измерение спектральных, энергетических и пространственных характеристик излучения, а также цветовых параметров анализируемого источника.

Ключевые слова: излучающий диод, индикатриса излучения, цветовые координаты, измерительный комплекс.

Результатом интенсивного развития технологий в области производства полупроводниковых светоизлучающих диодов (СД) и оптоэлектронных приборов на их основе стало широкое применение этих приборов в системах освещения различного назначения, отображения информации, световой сигнализации и др. Комбинация мощного излучения практически с любой формой его пространственного распределения, возможность получения множества цветовых оттенков в широком диапазоне яркостей открывают огромные перспективы использования СД в качестве источников света для этих устройств. Указанное обстоятельство приводит к необходимости осуществления все более точного и комплексного анализа спектральных, энергетических, пространственных характеристик и цветовых параметров излучения СД как на производстве, так и при создании высокоточных светотехнических устройств на их основе.

Существует большое количество разнообразных измерительных систем для контроля и аттестации СД. Однако подавляющее их большинство предназначено для избирательного контроля, т.е. анализа одной-двух характеристик излучения, например, индикатрисы излучения, спектра излучения и (или) цветовых параметров источника, спектра излучения и полного светового потока. При этом анализ пространственных характеристик излучения, как правило, осуществляется в одной плоскости или же, в лучшем случае, в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, а спектр излучения, полный световой поток и цветовые параметры оценивают интегрально, посредством использования интегрирующей сферы. Таким образом, ни одно из существующих устройств указанного назначения не производит комплексного контроля СД по всей полусфере излучения. Подобный подход не позволяет получить полной информации о качестве анализируемого СД.

Коллективом авторов разработаны принципы построения и реализующий их экспериментальный образец автоматизированного измерительного комплекса, способный помочь решению задачи комплексного контроля СД. Основными элементами системы являются две угловые координатные подвижки и малогабаритный волоконный спектрометр со спектральным диапазоном 200–1100 нм. Принцип работы системы заключается в автоматическом поточечном измерении параметров излучения СД в верхней полусфере излучения с одновременным контролем и выводом на экран компьютера спектральной характеристики, пространственной индикатрисы излучения, полного светового потока и рассчитанных цветовых координат исследуемого образца. Полностью автоматическая работа измерительного комплекса в течение цикла измерения (полного контроля одного СД) обеспечивается комплектом разработанного программного обеспечения. Минимальный шаг сканирования полусферы составляет 0,7°, время аттестации одного СД (при минимальном шаге сканирования) – не более 15 мин.

Разработанный автоматизированный аппаратно-программный комплекс прошел апробацию в рамках выполнения работ второго этапа государственного контракта № 07.514.11.4089 от 17 октября 2011 г. на тему «Исследование интеллектуальных оптико-электронных информационно-телекоммуникационных систем цветового анализа для повышения эффективности обогащения минерального сырья фотометрическим методом» при проведении исследований экспериментального образца информационно-телекоммуникационной системы цветового анализа. Кроме того, указанный измерительный комплекс был представлен на 7-й международной специализированной выставке лазерной оптической и оптоэлектронной техники «Фотоника. Мир лазеров и оптики-2012» среди новейших разработок НИУ ИТМО.

Основное назначение разработанного аппаратно-программного комплекса:

- контроль качества СД на производстве;
- разработка и контроль качества многоэлементных источников излучения для высокоточного позиционирования в различных областях промышленности [1];
- разработка и создание адаптивных (меняющих спектральные и цветовые характеристики) многоэлементных источников освещения объектов при цветовом анализе объектов, в частности, при колориметрической идентификации [2].

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы».

1. Мараев А.А., Тимофеев А.Н., Ярышев С.Н. Исследование метода спектрально-аналитической селекции при перекрестных связях в каналах цветных видеокамер // Изв. вузов. Приборостроение. – 2012. – № 4. – С. 17–22.
2. Горбунова Е.В., Перетягин В.С., Чертов А.Н. Организация освещения рабочей зоны оптоэлектронных систем цветового анализа промышленного назначения // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 3 (73). – С. 140.

Вакуленко Анатолий Дмитриевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, voron5266@yandex.ru

Горбунова Елена Васильевна – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, vredina_ia@mail.ru

Перетягин Владимир Сергеевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, peretyagin@mail.ru

Чертов Александр Николаевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, a.n.chertov@mail.ru

УДК 535.66, 621.384.4

ИСТОЧНИК УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ЦВЕТОВОГО АНАЛИЗА МИНЕРАЛОВ

А.Д. Вакуленко, Е.В. Горбунова, А.Н. Чертов

Рассмотрены проблемы анализа цвета люминесценции минералов, возбуждаемой ультрафиолетовым излучением. Предложена концепция организации освещения зоны анализа посредством многоэлементного источника на основе излучающих диодов с разными спектрами свечения.

Ключевые слова: ультрафиолетовое излучение, люминесценция минералов, многоэлементный источник излучения, цветовой анализ.

Ультрафиолетовое (УФ) излучение широко применяется в медицине, дефектоскопии, минералогии и других отраслях науки, техники, промышленности. В минералогии УФ излучением возбуждают флуоресценцию минералов, по цвету которой можно судить об их количественном и качественном составе [1]. Для наблюдения свечения, как правило, используют длины волн 254 нм и 365 нм, которые можно получить, например, с помощью ртутной лампы с линейчатым спектром (254, 303, 313, 365, 436, 546 нм и т.д.) и соответствующих интерференционных фильтров или дифракционных решеток. Возможно также использование УФ источников излучения с непрерывным спектром (например, дейтериевой лампы, излучающей в диапазоне 190–600 нм) в составе спектроанализаторов и спектрофотометров с последующим расчетом цветовых координат.

Указанные подходы к возбуждению люминесценции эффективны при визуальном наблюдении или контроле цвета люминесценции опытными специалистами-минералогами с целью решения различных поисковых, диагностических или аналитических задач. Однако они неприменимы для осуществления поиска идентификационных признаков минералов и последующей классификации в автоматическом режиме на основании результатов анализа цветовой характеристики свечения по причине низкой селективности.

Данный недостаток обусловлен следующими причинами:

1. цвет люминесценции под действием УФ излучения даже для нескольких групп одного типа минерального сырья может существенно отличаться от месторождения к месторождению вследствие разнообразия содержащихся в нем примесей;
2. использование узкополосного возбуждающего излучения не позволяет захватить достаточно широкую область УФ излучения, которая могла бы вызвать люминесценцию в различных диапазонах, в то время как широкополосное излучение, принимая во внимание причину 1, селективным считаться не может.

Для реализации оперативного анализа на нескольких длинах волн возбуждающего излучения с целью увеличения количества информационных параметров свечения минералов и, соответственно, селективности анализа разработаны теоретическая модель и физический макет многоэлементного УФ источника излучения на основе излучающих диодов с разными спектрами свечения.

Предложенная теоретическая модель позволяет подобрать конструктивные параметры многоэлементного источника (количество излучающих элементов и расстояние между ними), а также значения интенсивности излучения для каждого элемента для обеспечения равномерности облучения зоны анализа на заданном расстоянии от источника.

При физическом макетировании источника в качестве излучающих элементов использовались диоды с пиковыми длинами волн 360 и 405 нм. Проведенные предварительные экспериментальные исследования макета позволили отработать процесс адресного управления отдельными элементами источника для выравнивания распределения облученности по зоне анализа и разработать соответствующую электронную схему управления.

В качестве объектов исследования использовались минеральные образцы янтаря, рубина, хризоберилла и мусковита. Полученные результаты показали высокую степень совпадения с теоретическими данными о цвете люминесценции минералов [2].

Дальнейшим направлением исследований является создание более сложной модели источника, содержащего излучающие диоды с пиковыми длинами волн 260, 285, 330, 360 и 405 нм, разработка методики анализа цвета люминесценции и поиска селективных признаков минерального объекта в автоматическом режиме и соответствующей электронной схемы управления источником.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы».

1. Марфунин А.С. Спектроскопия, люминесценция и радиационные центры в минералах. – М.: Недра, 1975. – 327 с.
2. Горобец Б.С., Рогожин А.А. Спектры люминесценции минералов. – М.: ВНИИМ, 2001. – 316 с.

Вакуленко Анатолий Дмитриевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, voron5266@yandex.ru

Горбунова Елена Васильевна – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, vredina_ia@mail.ru

Чертков Александр Николаевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, a.n.chertov@mail.ru

ДОПОЛНЕНИЕ

к статье А.Н. Соколова «Методика расчета свободноконвертируемого теплообмена на твердых поверхностях в широком интервале температур», опубликованной в журнале «Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики», выпуск 2(78) 2012 года:

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, государственный контракт №16.516.11.6102.

REVIEW ARTICLE

DISCRETE SWITCHING WAVES AND DISSIPATIVE SOLITONS IN THE COHERENTLY EXCITED NANOSTRUCTURES AND METAMATERIALS

N. Rosanov, N. Vysotina, A. Shatsev, A. Desyatnikov, I. Shadrivov, R. Noskov, Yu. Kivshar

We have carried out the comparative analysis of localized structures – switching waves and dissipative solitons – in the three discrete nonlinear systems that are resonantly excited by a coherent holding radiation: chain of molecules, chain of metallic nanospheres, and lattice of split ring resonators.

Keywords: dissipative solitons, discrete solitons, switching waves.

Nikolay Rosanov – The Scientific and Industrial Corporation “Vavilov State Optical Institute” (SIC SOI), RAS corresponding member, D.Sc., Section head, nrosanov@yahoo.com

Nina Vysotina – The Scientific and Industrial Corporation “Vavilov State Optical Institute” (SIC SOI), scientific researcher, nvvys@yahoo.com

Anatoly Shatsev – The Scientific and Industrial Corporation “Vavilov State Optical Institute” (SIC SOI), senior scientific researcher, PhD, anshat@yahoo.com

Anton Desyatnikov – Australian National University, senior staff scientist, PhD, asd124@physics.anu.edu.au

Il'ya Shadrivov – Australian National University, senior staff scientist, PhD, Queen Elizabeth II Scholarship holder, ivs124@physics.anu.edu.au

Roman Noskov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior staff scientist, PhD, nanometa@gmail.com

Yuri Kivshar – Australian National University, Academician of the Australian Academy of Sciences, Professor, D.Sc., Section head, The Ministry of Education and Science of Russia mega grant holder, ysk@internode.on.net

OPTICAL AND OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS. OPTICAL TECHNOLOGIES
SORTING OF DIAMOND RAW MATERIALS BY OPTICAL-ELECTRONIC METHODS

E. Gorbunova, V. Korotaev, A. Chertov

Existing problems in the field of diamond raw materials sorting are discussed in accordance with the classification attributes that determine the market value of diamonds. An approach to the process of quality assessment and certification of diamond crystals is proposed using elements of the color measurement theory and models for complex objects description, as well as the laws of crystal formation and growth.

Keywords: diamond raw materials, optical-electronic method, color sorting, crystal shape.

Elena Gorbunova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior staff scientist, PhD, vredina_ia@mail.ru

Valery Korotaev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Dean, D.Sc., Professor, korotaev@grv.ifmo.ru

Alexander Chertov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, a.n.chertov@mail.ru

PHOTONICS AND OPTICAL INFORMATICS

REFLECTION OF FEW CYCLE LIGHT WAVES FROM METAL MIRROR
WITH NONLINEAR DIELECTRIC LAYER

E. Buyanovskaya, S. Kozlov, A. Sukhorukov, Yu. Kivshar

The peculiarities of light waves reflection from metal mirror with nonlinear dielectric layer were theoretically investigated. It was shown that at few cycle pulse reflection from the metal mirror with transparent dielectric layer, triple frequencies radiation is generated in dielectric layer due to interaction of pulses in the layer and that ratio of generated radiation energy to the energy of input pulse is increasing with the decrease of oscillation number in the incident pulse.

Keywords: few cycle pulses, interaction of counter-propagating waves, nonlinear dielectric media.

Elizaveta Buyanovskaya – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, junior research fellow, lee.buyanovskaya@gmail.com

Sergey Kozlov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Dean, Department head, D.Sc., Professor, kozlov@mail.ifmo.ru

Andrei Sukhorukov – Australian National University, Associate professor, PhD, ans124@physics.anu.edu.au

Yuri Kivshar – Australian National University, Professor, D.Sc., ysk124@physics.anu.edu.au

INFRARED RADIATION PUMP SYSTEM FOR CONTINUOUS WAVE TERAHERTZ RADIATION SOURCE WITH PROGRAM CONTROL

A. Vedeneev, N. Ionina, V. Orlov, A. Rokhmin, E. Sedykh, M. Khodzitskiy, S. Kozlov

The infrared radiation pump system for photoconductive antenna, a continuous wave terahertz radiation source, based on frequency mixing of two semiconductor lasers at 1.5 μm was created. This system enables to extend the working tuning range of THz spectrometer to 18 THz with increment of 0.125 GHz. In addition, the original software, making it possible to use the pump system of antenna as a high-precision infrared spectrometer in the wavelength range of 1450 - 1590 nm, was developed.

Keywords: pump system, terahertz radiation, infrared spectroscopy.

Alexei Vedeneev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, avedeneev.91@mail.ru

Natalia Ionina – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, leading engineer, shurch@yandex.ru

Vyacheslav Orlov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, senior staff scientist, orlov4v8v@yandex.ru

Alexei Rokhmin – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, assistant, rokhmin@oi.ifmo.ru

Egor Sedykh – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, manroom.harshrealm@gmail.com

Mikhail Khodzitskiy – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, assistant, PhD, khodzitskiy@yandex.ru

Sergey Kozlov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Dean, Department head, D.Sc., Professor, kozlov@mail.ifmo.ru

CLOAKING COVER BASED ON THE SPIRAL RESONATORS

A. Vozianova, M. Khodzitskiy

The cloaking cover based on spiral structures for object hiding in the super high-frequency range is studied. This cover can hide an object for two polarizations (TE and TM) of the electromagnetic field. The experimental and numerical simulation results for cloaking cover with horizontal spirals relative to the cover plane are shown.

Keywords: cloaking cover, spiral resonators, electromagnetic field, metamaterials, transformation optics, invisibility.

Anna Vozianova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, vozianova@gmail.com

Mikhail Khodzitskiy – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, assistant, PhD, khodzitskiy@yandex.ru

LASER SYSTEMS AND LASER TECHNOLOGIES

INVESTIGATIONS OF SPATIAL RADIATION CHARACTERISTICS OF DIODE END-PUMPED SOLID-STATE LASERS

V. Nazarov, L. Khloponin, V. Khramov, N. Fedorov

Radiation characteristics of q-switch and stationary generation of end-pumped Er:YLF-laser taking into account inhomogeneous gain constant are investigated. The model of laser radiation and active media interaction at both generation cases is developed. Main spatial and energy dependences on laser resonator parameters and doping concentration in active element are presented for monopulse lasing. The stationary fundamental mode intensity dependences on pumping parameters and small signal gain constant are presented.

Keywords: erbium lasers, spatial characteristics of laser generation, diode end-pumping, stationary lasing.

Vyacheslav Nazarov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior staff scientist, PhD, lab255@grv.ifmo.ru

Leonid Khloponin – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior staff scientist, PhD, l_khloponin@yahoo.com

Valery Khramov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, D.Sc., khramov@grv.ifmo.ru

Nikita Fedorov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, nikifedorov@mail.ru

STUDY OF CARBON NANOSTRUCTURES FORMED WITH MILLISECOND PULSES OF GLASS: YB, ER LASER

A. Belikov, A. Skripnik, N. Zulina

Possibility of amorphous carbon deposition on solid substrate surfaces with separated nanoparticles with sizes about 20 nm formed under Glass: Yb, Er laser pulses impact on graphite containing composite is shown

experimentally for the first time. Nanomaterial investigation results by optical and scanning electron (SEM) microscopy are demonstrated. Its affection on micro hardness of substrates based on steel, dentin and tooth enamel is studied as well.

Keywords: carbon nanostructures, Glass: Yb, Er laser, scanning electron microscopy.

Andrei Belikov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, meddv@grv.ifmo.ru

Alexei Skripnik – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate Professor, PhD, Associate professor, alesch_skrypnik@mail.ru

Natalia Zulina – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, zulinatsu@mail.ru

LASER AND MEDICAL TECHNOLOGIES

ABLATION OF HARD TISSUES OF HUMAN TOOTH BY YLF: ER LASER RADIATION WITH DIODE PUMPING

A. Belikov, M. Inochkin, A. Skripnik, L. Khloponin, V. Khramov, K. Shatilova

Prototype of YLF: Er diode-pumped micro laser was developed. Influence features of the developed micro laser prototype radiation with a wavelength of 2.84 μm on hard tissues of human tooth were examined. Effects of turning white, carbonization and ablation of dental hard tissues as a result of laser exposure were found. Thresholds of these effects were identified. It was established that the micro hardness of human dentin can be increased by more than 20% as a result of repeated exposure of laser pulses with energy lower than the turning white threshold.

Keywords: YLF: Er laser, diode pumping, enamel, dentine, ablation, micro hardness.

Andrei Belikov - Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, meddv@grv.ifmo.ru

Mikhail Inochkin – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior staff scientist, PhD, m_inochkin@mail.ru

Alexei Skripnik – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate Professor, PhD, Associate professor, alesch_skrypnik@mail.ru

Leonid Khloponin – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior staff scientist, PhD, l_khloponin@yahoo.com

Valery Khramov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, D.Sc., khramov@grv.ifmo.ru

Ksenia Shatilova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, kshatilova@mail.ru

ANALYSIS AND SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS

LINEAR SWITCHING OF NONLINEAR DEVICES SPACE STRUCTURE FOR BINARY CODES RECURRENT CONVERSION

A. Ushakov, E. Yaitskaya

Linear switching problem is considered for binary codes recurrent conversion of nonlinear devices space structure with the memory block built in the logic of arbitrary triggers using nonlinear signal. Synthesis algorithm of such devices is proposed. Illustrative example is presented.

Keywords: arbitrary trigger, transition and excitation functions of input triggers, space structure, switching input matrix, main conjunction of state vector, switching signal.

Anatoly Ushakov – Saint Petersburg National Research University of Information Technology, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, ushakov-AVG@yandex.ru

Elena Yaitskaya – Saint Petersburg National Research University of Information Technology, Mechanics and Optics, postgraduate, yaitskayaes@mail.ru

THREE PHASE ACTIVE VOLTAGE RECTIFIER SYNCHRONIZATION WITH MAINS SUPPLY

P. Borisov, N. Polyakov

Realization method of three phase active voltage rectifier control system with synchronization with mains supply in the non-ideal voltage shape conditions is presented. The workability and energetic efficiency of proposed control system is confirmed by simulation in MATLAB\Simulink software shell.

Keywords: active voltage rectifier, space-vector control, phase locked loop.

Pavel Borisov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, borisov@ets.ifmo.ru

Nikolay Polyakov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, Polyakov.n.a@gmail.com

STRUCTURAL MODEL, A MODEL STUDY OF THE ELECTRIC DRIVE DYNAMICS WITH DOUBLE FED MACHINE AND DIRECT TORQUE CONTROL

A. Lyapin

The article presents the main features and advantages of an electric drive with double fed machine. Structural model is developed and dynamic characteristics of the electric drive with doubly fed machine and direct torque control are obtained.

Keywords: electric drive, double fed machine, direct torque control, structural model.

Anatoly Lyapin – Baltic State Technical University «Voenmekh» n.a. D.F. Ustinov, postgraduate, swatin1@rambler.ru

SIGNALS IMITATOR AT THE RECEIVING ELEMENTS OUTPUT OF THE PASSIVE HYDROACOUSTIC STATION WITH FLEXIBLE EXTENSIVE TRAILING ANTENNA

Yu. Shafranyuk

Mathematical model is proposed for the signals imitator at the receiving elements output of the flexible extensive trailing antenna, taking into account the characteristics of the radiation, propagation and reception of signals and noise in real sea conditions. Requirements for the simulator are presented. General scheme and design principle are proposed. Imitator operability is illustrated on the example of the simulated data.

Keywords: hydro acoustics, passive hydro acoustic stations, antennas, multi beam propagation, simulation.

Yulia Shafranyuk – JSC «Electropribor», postgraduate, Julis85@yandex.ru

COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES

MATHCAD FUNCTIONS FOR VECTOR OPTIMIZATION OF CLUSTER STRUCTURE BASED ON STEM METHOD

K. Bulygin, V. Pinkevich, V. Bogatyrev

Vector optimization problems solution means in *Mathcad* system of computer mathematics on the basis of *STEM* method are offered. Application of the offered means for cluster structure optimization is considered.

Keywords: vector optimization, discrete optimization, *STEM*, decision making, cluster, computer mathematics, *Mathcad*.

Kirill Bulygin – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, kirill.bulygin@gmail.com

Vasiliy Pinkevich – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, vasiliy.pinkevich@yandex.ru

Vladimir Bogatyrev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, vladimir.bogatyrev@gmail.com

DECOMPOSITION OF n-DIMENSIONAL DIGITAL SIGNALS ON RECTANGULAR WAVELET BASIS

A. Grishentsev, A. Korobeynikov

Decomposition method for n-dimensional digital signals obtained on the base of wavelet transform is considered, and n-dimensional digital signals are considered as a superposition of the chosen wavelets. The practical application of the method is possible for conversion and processing of static and dynamic images, steganography, the spectral analysis of multi-dimensional discrete field structures, and solution of mathematical physics problems.

Keywords: decomposition of n-dimensional signals, spectral analysis, digital signal processing.

Alexei Grishentsev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, tigerpost@ya.ru

Anatoly Korobeynikov – Saint Petersburg Branch Foundation of the Russian Academy of Sciences “Institute for Earth Magnetism, Ionosphere and Radiowaves n. a. N.V.Pushkov RAS”, Deputy director for science, D.Sc., Professor, Korobeynikov_A_G@mail.ru

ORGANIZATION AND DESIGN TOOLS OF RECONFIGURABLE COMPUTING SYSTEMS

A. Rumyantsev

The paper presents the basic definitions, concepts and features of reconfigurable computing systems. Classification criteria for these systems are defined and division of the best-known of them based on those criteria is done. Existing approaches to effectiveness evaluation of the reconfigurable computing systems are presented. Design tools status for such systems is considered.

Keywords: reconfigurable computing systems, «granularity» of calculations, classification criteria for computing systems, performance evaluation of computing systems.

Alexander Rumyantsev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, darkstreamray@gmail.com

**MECHANICS AND MECHATRONICS
TRANSFORMATION OF DYNAMIC POLYNOMIAL SYSTEMS
BY CHEBYSHEV APPROXIMATION**

V. Melnikov

This paper presents a new method of nonlinear model simplification for mechanical control systems presented by an autonomous differential equations system of a polynomial structure connected with Poincare-Dulac normalization method. Change in the method is made consisting in approximation of high degrees remainder terms by less degree polynomials with their saving in the equations and significant rise of changed system accuracy. The problem of transformation of phase variables for simplification of a mathematical model is considered. Chebyshev economization method is used to approximate remainder terms.

Keywords: autonomous system of dynamic equations, polynomial transformation of phase coordinates, Poincare-Dulac normal forms, Chebyshev approximations.

Vitaly Melnikov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, PhD, Associate professor, melnikov@mail.ifmo.ru

**ALGORITHMIC REALIZATION FOR RESEARCH METHOD
OF THE NONLINEAR DYNAMIC SYSTEMS**

S. Ivanov

The algorithm for mathematical and software realization of research method of the nonlinear dynamic systems with three degrees of freedom is suggested. The nonlinear mathematical model of the dynamic system that contains polynomials to the fourth degree from phase variables with permanent and periodic parameters is examined. As a result of method application a nonlinear mathematical model of the system motion is brought to the autonomous kind, and the substantial parameters of the dynamic system motion are determined. An algorithm of the modified method of polynomial transformations and algorithmic formulas of method software realization is given, and analysis of the device dynamic system with three degrees of freedom is conducted.

Keywords: algorithm of analytical transformation method, research methods, nonlinear systems with three degrees of freedom.

Sergey Ivanov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, sivanov@mail.ifmo.ru

OPTIMIZATION OF SUPPORT LOCATION IN MICROMECHANICAL GYROS

D. Eliseev, D. Rozentsvein

The method of support location optimization in a micromechanical gyro is designed. Optimization criteria of support location and modified settings for support system are proposed. Calculations of variable elastic bracket models are done by finite-element analysis method. The results have proved application possibility of the developed method for optimization of quantity and support location in micromechanical gyros.

Keywords: micromechanical gyro, elastic bracket, dynamic load.

Daniil Eliseev – Concern “CSRI Elektropribor”, JSC, design engineer, eliseev.dp@gmail.com

Dmitry Rozentsvein – Concern “CSRI Elektropribor”, JSC, scientific researcher, Rosenzwein@mail.ru, office@eprb.ru

**MATERIALS TECHNOLOGY AND NANOTECHNOLOGIES
TRIBOLOGICAL PERFORMANCE OF POLYMER NANOCOMPOSITES
MODIFIED BY FULLEROID MATERIALS**

B. Pikhurov, V. Zuev

The effect of fulleroid modifiers and carbon fibers on tribological properties of polymer nanocomposites based on thermoplastic polymeric matrixes (polyamide 6) was investigated. It was shown that fulleroid modifiers insertion makes it possible to decrease the friction factor of polymer composites and improve mechanical and tribological properties of composites. The using of carbon fibers for polyamide 6 modification at mechanical properties growth leads to the friction factor growth on steel more than twice as compared with the initial polymer matrix.

Keywords: fullerene C₆₀, polyamide 6, nanocomposites, tribological properties, friction factor.

Dmitry Pikhurov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, firus07@rambler.ru

Vyacheslav Zuev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, zuev@hq.macro.ru

QUALITY EVALUATION OF JUICES BY THEIR SOLID COMPONENTS STRUCTURE ANALYSIS WITH OPTICAL METHOD

M. Tomilin, I. Fadeev

Optical method application, based on the nematic liquid crystals (NLC) usage for structure visualization of solid components of juices is described. These structures visualization is done at variation of the boundary layer orientation of nematic liquid crystal. Not researched sediment structures themselves are observed but liquid crystal layer deformation called forth by them. Obtained images of these structures are unequivocally connected with product properties. Fruit and vegetable juices stored under different conditions were used for investigation. Comparison of their structures was made and it showed the suitability of the method for product quality control.

Keywords: nematic liquid crystal, structure visualization, juices, product quality, polarizing microscope.

Maxim Tomilin – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, mgtomilin@mail.ru

Ivan Fadeev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, magic-mbllo@rambler.ru

COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS TWO APPROACHES TO STRUCTURING OF ALTERNATIVES

Yu. Kandyrin, G. Shkurina

The article deals with models for formation of partial usage alternatives under condition of their linear ordering in work. The methods are considered based on formation of a resultant partial order by means of Berzha graph and on transformations of set factor. This approaches study is necessary for criterion structuring of object variants at multiple-way alternatives choice.

Keywords: choice problems, optimal variants, linear and partial ordering of alternatives, criterion structuring of objects.

Yuri Kandyrin – National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Professor, PhD, Professor, ywk@mail.ru

Galina Shkurina – Volgograd State Technical University, Associated professor, PhD, Associated professor, shgl@bk.ru

DESIGN APPROACHES FOR ENGINEERING DOCUMENTATION OUTPUT AUTOMATED SYSTEM

A. Sumtsov

The necessity for the automated output of text documentation module system creation, based on analogs review, is given in this paper. It makes it possible to extend its functionality and compatibility for solving specific tasks without restructuring. Approaches to text documentation automated system design “Autodoc” are proposed in the text. Main requirements to the system are taken into consideration.

Keywords: documentation output automated system, module structure, database, engineering documentation, output, formation, analysis, optimization, approach.

Andrei Sumtsov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, felix2k@tut.by

CLINCHES REMOVAL AUTOMATION IN THE PRINTED CIRCUIT TOPOLOGY

S. Luzin, S. Popov, Yu. Popov

The article deals with solution of commonly encountered clinch problem at automatic routing of printed-circuit boards. Ways of automatic clinches recognition and algorithms of their elimination are given.

Keywords: CAD, automatic-routing, clinches.

Sergei Luzin – “Eremex”, Ltd., technical director, D.Sc., luzin@eremex.com

Sergei Popov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, sergey.popove@yandex.ru

Yuri Popov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, yurpopov@rambler.ru

INFORMATION SECURITY METHODS AND SYSTEMS EVALUATION OF INFORMATION SECURITY IN CLOUD COMPUTING BASED ON THE BAYESIAN APPROACH

I. Zikratov, S. Odegov

The article deals with a new approach to analysis and quantitative evaluation of the resources security in cloud systems based on the use of distributed computing network implementation features. To improve the estimate validity in the proposed method the use of the Bayesian approach is suggested.

Keywords: information security, cloud computing, risk assessment.

Igor Zikratov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, D.Sc., Professor, zikratov@cit.ifmo.ru

Stepan Odegov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, odegov.sv@gmail.com

PREDICTION OF SOFTWARE ARCHITECTURE PROTECTION LEVEL

A. Gvozdev, I. Zikratov, I. Lebedev, S. Lapshin, I. Solov'yov

This article deals with a methodology for assessing the software architecture protection level. This methodology makes it possible to compare the software protection level of the complex firmware in order to justify and choose its architecture on the early stages of its lifecycle and detect the most vulnerable software modules.

Keywords: software architecture protection, software architecture selection, vulnerability evaluation.

Alexei Gvozdev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, E-mail a.gvozdev@rcwg.net

Igor Zikratov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, D.Sc., Professor, zikratov@cit.ifmo.ru

Ilya Lebedev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, lebedev@cit.ifmo.ru

Sergei Lapshin – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, sv.lapshin@gmail.com

Igor Solov'yov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, sin@inbox.ru

RISK DECREASE METHODS OF SOFTWARE AVAILABILITY LOSS IN CRITICAL INFORMATION SYSTEMS

S. Arustamov, M. Genin

The article describes the possibilities and restrictions of reservation techniques for risk decrease of availability loss in critical information systems. Description of updates decomposition methodology is suggested for decreasing the risk of availability loss for critical information system during updates. The usage of decomposition methodology together with reservation techniques is proved to decrease the risk of availability loss in critical systems during updates. Example, illustrating the efficiency of updates decomposition methodology, is given.

Keywords: information systems, reservation, availability, risk of availability loss, update, decomposition method, elementary update.

Sergei Arustamov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, sergey.arustamov@gmail.com

Mikhail Genin – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, gmg@rambler.ru

ECONOMICS AND FINANCES. MANAGEMENT NEW MARKETING TOOL DESIGN FOR COMPETITIVE UNIVERSITY INNOVATION PRODUCTS PROMOTION

D. Mironova

The article deals with various approaches for inclusion the representatives of research and business structures into the innovation and entrepreneurial activity, and the development of a new integrated marketing approach for promotion of competitive university technologies is proposed.

Keywords: marketing, technology competitiveness, business network, innovation and entrepreneurial activity.

Daria Mironova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Head of Marketing section, mironova@mail.ifmo.ru

COMPETITIVENESS MANAGEMENT OF TRADE ENTERPRISES IN THE CONDITIONS OF INNOVATIVE DEVELOPMENT

O. Tchernysheva

The article presents the main research results of the competitiveness management problem for trade enterprises in the conditions of dynamic innovative development. The article considers the problems of market operators' consolidation, the Internet growing role in the life of the 21st century consumer, development strategy of Russian and Western retail, etc. Ways of the enterprise surviving in the conditions of intensifying competition are suggested.

Keywords: competitiveness, retail, innovations, consolidation, virtual trade.

Olga Tchernysheva – Saint Petersburg University of Commerce and Economics, senior lecturer, ov49@mail.ru

INNOVATIVE ENVIRONMENT IN THE STATE-CONTROLLED BANKS ACTIVITY

T. Krasnoperova

The article deals with the actual problem of banking system innovative development and a state role in the innovative environment formation. Ways of activation for banks innovative activity are suggested.

Keywords: innovative environment, innovations, bank system, economic interests.

Tanzilya Krasnoperova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, krasntat@mail.ru

BRIEF REPORTS

ALGORITHM FOR PARAMETRIC CONVERGENCE IMPROVEMENT OF THE SINUSOIDAL SIGNAL FREQUENCY BY CASCADE REDUCTION

S. Aranovskiy, A. Bobtsov, A. Vedyakov, S. Kolyubin, A. Pyrkin

The estimation problem for unknown frequency in a sinusoidal signal corrupted by noise is considered. The algorithm of parametric convergence improvement for the unknown frequency estimation to the true value is proposed on the base of cascade reduction method.

Keywords: sinusoidal signal, reduction, identification, disturbances.

Stanislav Aranovskiy – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior scientific researcher, PhD, s.aranovskiy@gmail.com

Alexei Bobtsov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Dean, Department head, D.Sc., Professor, bobtsov@mail.ifmo.ru

Alexei Vedyakov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, engineer, vedyakov@gmail.com

Sergei Kolyubin – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, s.kolyubin@gmail.com

Anton Pyrkin – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, assistant, PhD, a.pyrkin@gmail.com

ROBUSTNESS DROP ESTIMATION OF DESIGN DOCUMENTATION PREPARATION BY CALS-TECHNOLOGIES IN INSTRUMENT MAKING

I. Zharinov, O. Zharinov, R. Shek-Iovsepyantz, V. Suslov

The article deals with the robustness estimation procedure of design documentation preparation at the device development using CALS-technologies. The dependence for the robustness drop of documentation preparation from the number of documents per product prepared by electronic method using the technology of electronic document management is stated.

Keywords: robustness, documentation design, electronic document management.

Igor Zharinov – Saint Petersburg Scientific Design Bureau “Electroautomatika” named after P. Efimov, Head of Learning Scientific Center, D.Sc., Associate professor, igor_rabota@pisem.net

Oleg Zharinov – Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Associate professor, PhD, Associate professor, zharinov73@hotmail.ru

Ruben Shek-Iovsepyantz – Saint Petersburg Scientific Design Bureau “Electroautomatika” named after P. Efimov, Chief designer, D.Sc., Professor, postmaster@elavt.spb.ru

Vladimir Suslov – Saint Petersburg Scientific Design Bureau “Electroautomatika” named after P. Efimov, Expert Council Director, postmaster@elavt.spb.ru

CROSS-PLATFORM SOFTWARE DEVELOPMENT TOOLS

E. Oshurok, K. Ezhova

The article deals with implementation of cross-platform toolkit, designed for software development on C / C++ family programming languages for desktop and mobile platforms of different purposes. The toolkit feature is the ability to move programs between platforms without source code changing. The structure of instruments is considered and a generalized algorithm for implementing of applications portability with high performance maintaining is revealed. The possible directions of further tools application are given.

Keywords: cross-platform, portability, platform, cross-compiler, development tools.

Eduard Oshurok – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, creddy@inbox.ru

Ksenia Ezhova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, EzhovaKV@aco.ifmo.ru

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR DEVICE OF DIGITAL AUTOCOLLIMATOR MARKS CONTROL

A. Litvinovich

The brief report deals with the algorithm and software creation for control operations automation of marks characteristics for the digital autocollimator.

Keywords: digital autocollimator, marks control.

Alexander Litvinovich – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, litvinovich.alexander@gmail.com

DESIGN AND APPLICATION FEATURES OF THE MODERN AUTONOMOUS NAVIGATION SYSTEMS

I. Komarova

Implementation problems for various schemes of navigation systems are considered.

Keywords: navigation, system, information, gyroscope, accelerometer.

Irina Komarova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, senior staff scientist, ppaannddaa@mail.ru

MEASURING AND MONITORING INSTALLATION FOR LEDS PARAMETERS AND CHARACTERISTICS

A. Vakulenko, E. Gorbunova, V. Peretyagin, A. Chertov

The article describes creation results of automated hardware-software system for monitoring and certification of emitting diodes, which provides simultaneous measurement of spectral, spatial and energy characteristics of radiation, as well as color parameters of the analyzed source.

Keywords: emitting diode, radiation indicatrice, color coordinates, measuring system.

Anatoly Vakulenko – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, voron5266@yandex.ru

Elena Gorbunova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior staff scientist, PhD, vredina_ia@mail.ru

Vladimir Peretyagin – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, peretyagin@mail.ru

Alexander Chertov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, a.n.chertov@mail.ru

ULTRAVIOLET RADIATION SOURCE FOR OPTICAL-ELECTRONIC SYSTEMS OF MINERALS COLOR ANALYSIS

A. Vakulenko, E. Gorbunova, A. Chertov

Color analysis problems of minerals luminescence excited by ultraviolet radiation are considered. The concept of the analysis zone lighting by the multi component radiation source based on the emitting diodes with different emission spectra is proposed

Keywords: ultraviolet radiation, luminescence of minerals, multi component radiation source, color analysis.

Anatoly Vakulenko – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, voron5266@yandex.ru

Elena Gorbunova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior staff scientist, PhD, vredina_ia@mail.ru

Alexander Chertov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, a.n.chertov@mail.ru

Уважаемые читатели!

«Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики» издается с 2001 года как периодическое научное и научно-образовательное издание. Журнал входит в утвержденный Высшей Аттестационной комиссией «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук». Все публикации в журнале проходят рецензирование. Периодичность издания составляет 6 выпусков в год, объем каждого выпуска - 140 страниц.

Журнал печатает материалы, отражающие достижения науки, техники и технологии в области современного приборостроения и новых информационных технологий в России и за рубежом по следующим направлениям: информационные технологии, информационно-телекоммуникационные системы, элементы и устройства вычислительной техники и систем управления, системный анализ и математическое моделирование, системы автоматизированного проектирования, оптика, оплотехника и приборостроение, физика твердого тела, микроэлектроника, нанотехнологии, мехатроника, методы и системы защиты информации, биомедицинские технологии, экономика и финансы.

Издание зарегистрировано как сериальное в Международном центре ISSN, номер ISSN 2226-1494, а также в Федеральной службе по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций, свидетельство ПИ ФС77-47243 от 10 ноября 2011.

На журнал «Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики» можно оформить подписку в любом отделении связи, а также в редакции журнала (Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, комн. 330). Подписной индекс 47 197 по каталогу агентства Роспечать (Газеты. Журналы).

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